



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Estudio de la separación de la biomasa algal en una planta piloto de tratamiento de agua residual

Trabajo realizado por:

Antonio Ortiz Ruiz

Dirigido por:

Joan García Serrano

Enrica Uggetti

Máster en:

Ingeniería Ambiental

Barcelona, 15 de Junio de 2018

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Abstract

Uno de los principales retos de investigación sobre el ciclo integral del agua es el tratamiento de aguas residuales con microalgas y la posterior recuperación de biomasa para la generación de biocombustibles y bioproductos. La separación y captura de microalgas es uno de los grandes desafíos para la producción de biomasa a gran escala. Este trabajo se centra en el proceso de separación y recuperación de biomasa en una planta piloto en las instalaciones del proyecto europeo INCOVER (Eco-innovative technologies for the recovery of wastewater resources), ubicado en el Parc UPC-Agròpolis de la Universitat Politècnica de Catalunya, en Viladecans (Barcelona). El estudio se llevó a cabo con un decantador lamelar de 700 L, un caudal de 400 L/h y un volumen diario de agua a tratar de 6900 L. Para el proceso de coagulación se ha usado policloruro de aluminio con dosis de entre 5 y 12 mg Al^{3+} /L y la purga de la biomasa sedimentada se ha llevado a cabo con un caudal de 400 L/h. Las pruebas de jar-test y turbidez han demostrado que es posible establecer una relación entre la turbidez en el flujo de entrada del decantador y la dosis óptima de coagulante, aumentando en 0,01 mg Al^{3+} /L las dosis de coagulante por cada valor de turbidez dentro del rango de 20-500 NTU. En un segundo paso, se estudió el proceso de sedimentación dentro del decantador y cómo influye en los requisitos de purga de biomasa. Las pruebas realizadas mostraron que para valores de turbidez entre 100 y 500 NTU, el volumen de purga requerido fue un 75% menor que el obtenido en un ensayo de columna, debido al espesamiento producido en la zona de sedimentación del decantador. Sin embargo, se observó que no toda la biomasa era eliminada del decantador y que su recuperación requería de caudales de purga de entre 1 y 2 L/s. Finalmente, se estudió cómo la dosificación del policloruro de aluminio afectó al pH. Los resultados indicaron que el pH disminuye entre 1 y 2.5 puntos en un rango de dosificación entre 5 y 12 mg Al^{3+} /L. Este estudio revela los desafíos del trabajo en una planta a escala piloto y proporciona soluciones prácticas para la toma de decisiones con el fin de mejorar la forma de operar en una planta a escala real.

Microalgae wastewater treatment is a great challenge in the framework of the integrated water cycle which can allow the generation of biofuels and biorproducts. The separation of microalgae is one of the great challenges for the production of biomass on a large scale. This work focuses on the process of separation and recovery of biomass in a pilot plant in the facilities of the INCOVER European project (Eco-innovative technologies for the recovery of wastewater resources), located in the UPC Park - Agròpolis of the Universitat Politècnica de Catalunya, Viladecans (Barcelona). The study was carried out with a lamellar settler of 700 L, a flow rate of 400 L/h and a daily volume of water to be treated of 6900 L. For the coagulation process aluminum polychloride has been used with a doses ranging from 5 to 12 mg Al^{3+} /L and the purge of the sedimented biomass has been carried out with a flow rate of 400 L/h. The jar-test and turbidity tests have shown that it is possible to establish a relationship between the turbidity in the inflow of the settler and the optimal dose of coagulant, increasing by 0.01 mg Al^{3+} /L the doses of coagulant for each value of turbidity within the range of 20 - 500 NTU. In a second step, the sedimentation process inside the settler was studied and how it influences biomass purge requirements. The tests carried out showed that for turbidity values between 100 and 500 NTU, the purge

volume required was 75% less than the obtained in a column test, due to the thickening produced in the sedimentation zone. However, it was observed that not all the biomass was removed from the settler and was necessary purge flows between 1 and 2 L/s in order to obtain a better recovery. Finally, it was studied how the dosage of aluminum polychloride affected the pH. The results indicated that the pH decrease between 1 and 2.5 in a dosage range between 5 and 12 mg Al³⁺/L. This study reveals the challenges of work in a pilot scale plant and provides practical solutions for decision-making in order to improve the way of operate in a field scale plant.

INDICE

1. Introducción	1
2. Objetivos	2
2.1. Definir características técnicas del decantador	2
2.2. Obtención de las dosis óptimas de coagulante en función de la turbidez	2
2.3. Estudio de la variación del pH en función de la dosificación	2
2.4. Control del caudal de las purgas a partir del test de sedimentación y turbidez	2
3. Estado del arte	3
3.1. Sedimentación discreta	3
3.2. Sedimentación floculenta	7
3.3. Sedimentación zonal	7
3.4. Sedimentación lamelar	12
4. Alcance y límites del sistema	16
5. Material y métodos	19
5.1. Decantador	19
5.1.1. Características	19
5.1.2. Modo de operación	23
5.2. Ensayos realizados	24
5.2.1. Jar-test	24
5.2.2. Test de sedimentación V_{30}	25
5.2.3. Velocidad de sedimentación	26
5.2.4. Turbidez y pH	26
5.2.5. Test de purga	26
5.2.6. Purga pulsante	27
6. Resultados y discusión	30
6.1. Jar-test	30
6.2. Carga hidráulica	32
6.3. Variación de pH	35
6.4. Volumen, concentración y biomasa obtenida	37
6.5. Purga pulsante	41
7. Trabajo futuro	45
7.1. Ampliación del floculador	45
7.2. Aumento del caudal en la purga	47
8. Conclusiones	49
9. Referencias	50
10. Agradecimientos	51

1. Introducción

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en microalgas constituyen una tecnología alternativa a las plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales (EDAR), que ha despertado un creciente interés científico en los últimos años. Estos sistemas, al eliminar los contaminantes de las aguas residuales, permiten la producción de biomasa de microalgas, que se puede valorizar, por ejemplo, como sustrato para la digestión anaeróbica para producir biogás, biofertilizante y otros bioproductos con explica Gutierrez et al. (2016). Sin embargo, la separación y captura de la biomasa es técnicamente un desafío debido a su baja densidad (0.3 a 5 g L) y su pequeño tamaño (2 a 20 μm), además este proceso es de vital importancia ya que representa entre el 20 y 30% de todos los costes de producción, tal y como explica Raí H. R. Hanashiro, (2018).

Hay muchos procesos mecánicos, químicos, biológicos y eléctricos e incluso la combinación de ellos para este fin, pero las investigaciones recientes se dirigen hacia métodos eficientes y económicos como la filtración, la centrifugación, la electroforesis y la floculación-sedimentación como explica Gutierrez et al. (2015).

Este trabajo está enfocado, no solo en el proceso de separación y captura de biomasa por floculación, además lo estudia a escala piloto, centrándose en lo restos que presenta el aumento de escala, tanto a nivel técnico como del propio proceso.

Para ello se ha contado con un sistema de decantación compuesto por un floculador, un tranquilizador, una zona de sedimentación lamelar, una zona de acumulación y purga de biomasa y un vertedero para la salida del agua clarificada. La capacidad total de sistema ha sido de 700 litros y el volumen de agua tratada diariamente de 6900 litros. El manejo de estas cantidades de trabajo se diferencia de las normalmente utilizadas en las investigaciones de laboratorio, por lo que el objetivo principal del estudio ha sido aplicar técnicas de control habituales en laboratorio para obtener resultados y elaborar parámetros de trabajo con los que simplificar la forma de operar en una planta a escala real.

Los ensayos de turbidez y sedimentación en columna han resultado muy útiles para establecer relaciones entre la turbidez a la entrada del sistema, parámetro sencillo y rápido de medir, y las dosificaciones de coagulante requeridas en cada momento. El ensayo de columna ha permitido elaborar un parámetro para determinar los volúmenes de purga necesarios en función de los test de sedimentación.

La importancia de estos parámetros de trabajo radica en la gran sensibilidad que tiene el rendimiento del sistema de decantación y captura de la biomasa a las condiciones de trabajo. Una incorrecta purga o dosificación de coagulante resultará en una clarificación inadecuada del agua y un poco concentración de biomasa en la purga. De la calidad de estos dos elementos de salida dependen directamente los procesos que les siguen. En el caso del agua clarificada, una baja turbidez es clave para la correcta desinfección y aprovechamiento. En el caso de la biomasa una óptima concentración es fundamental para los procesos de producción de biocombustibles, como el biogás en nuestro caso.

2. Objetivos

2.1. Definir características técnica del decantador

El primer objetivo es realizar un estudio de las características técnicas del decantador con el que se va a realizar el estudio de separación de microalgas de un cultivo en fotobioreactores. Estas características son, en primer lugar las dimensiones de los diferentes compartimentos que lo componen, sus volúmenes y los tiempos de retención hidráulica en cada uno de ellos. Y en segundo lugar el cálculo de su carga hidráulica, con la finalidad de conocer las condiciones de trabajo que es capaz de soportar.

2.2. Obtención de dosis óptimas de coagulante en función de la turbidez

El segundo objetivo es estudiar la demanda de coagulante para la correcta separación de la biomasa en función de la turbidez a la entrada del decantador. De esta manera se pretende conseguir una relación entre ambas que permita regular de forma ágil la dosificación de coagulante. Prescindiendo de ensayos más complejos que un simple muestreo de la turbidez, como lo es el jar-test.

2.3. Estudio de la variación del pH en función de la dosificación

En tercer lugar se estudiará la evolución del pH en función de los cambios en la dosificación, con la intención de obtener una relación de la variación del pH y conocer cuáles son los rangos de trabajo a la salida del decantador. El conocimiento de dicho rango es de importancia para los dos procesos posteriores a la separación de la biomasa: la digestión anaerobia de la misma y la ultrafiltración y desinfección del agua clarificada.

2.4. Control del caudal de las purgas a partir de test de sedimentación y turbidez

Por último se pretende establecer una relación entre la turbidez, el volumen sedimentado en un ensayo de columna V_{30} y el volumen de purga necesario en el decantador. De esta manera se pretende tener un control sobre la purga para la correcta recuperación de la biomasa y el óptimo funcionamiento del decantador.

3. Estado del arte

Este estudio se basa fundamentalmente en el documento de John C. Crittenden (2012), el cual muestra las diferentes maneras de estudiar la separación de agua y materia en suspensión. En él encontramos una clasificación de los diferentes tipos de sedimentación que existen y cómo se comportan, principios fundamentales para entender el comportamiento de nuestro decantador.

Los diferentes tipos de sedimentación dependen principalmente de la concentración de partículas y de si se utiliza coagulante o no. A continuación se describen los diferentes tipos de sedimentación y como se comportan durante el proceso de sedimentación.

3.1. Sedimentación discreta

La sedimentación discreta es aquella en la que se considera que la concentración es baja y no se usa ningún tipo de coagulante, por lo que las partículas no interactúan entre ellas a lo largo del proceso. Como explica John C. Crittenden (2012), si se considera que la partícula es esférica se puede decir que la única fuerza que la hará sedimentar será la fuerza de la gravedad, pero deberá vencer a las dos fuerzas verticales, el empuje y el rozamiento con el agua, tal y como se muestra en la Figura 1.

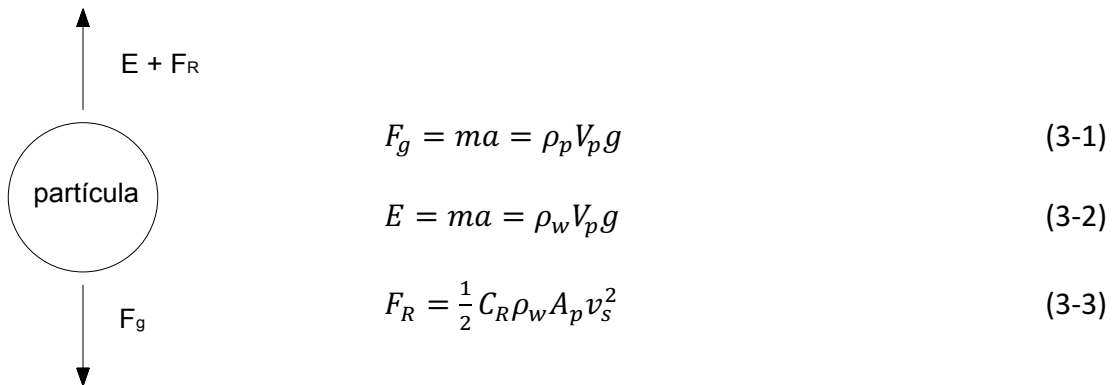


Figura 1: representación de partícula esférica y las fuerzas que actúan en ella durante la sedimentación.

Donde:

F_g = Fuerza de gravedad, N

E = empuje, N

F_R = fuerza de rozamiento, N

m = masa, kg

a = aceleración, m/s^2

ρ_p = densidad de la partícula, kg/m^3

ρ_w = densidad del agua, kg/m^3

V_p = volumen de la partícula, m^3

g = aceleración de la gravedad, $9,81 m/s^2$

C_R = coeficiente de rozamiento, adimensional

A_p = área proyectada de la partícula en sentido del flujo, m²

v_s = velocidad de sedimentación de la partícula, m/s

Para una partícula esférica su volumen y superficie proyectada son:

$$V_p = \frac{\pi}{6} d_p^3 \quad (3-4)$$

$$A_p = \frac{\pi}{4} d_p^2 \quad (3-5)$$

Donde d_p = diámetro de la partícula, m

Si establecemos un sumatorio de fuerzas como el de la fórmula 3-6 y sustituimos las formulas 3-1 a 3-5, con la premisa de que las fuerzas están en equilibrio con balance cero, se obtiene como resultado la fórmula 3-7 que permite calcular la velocidad de sedimentación.

Si partimos de una partícula en reposo ésta empezará a moverse debido al desequilibrio de fuerzas, ya que la fuerza de rozamiento empieza a actuar solo cuando hay movimiento, como se puede ver en la fórmula 3-3. Entonces la partícula empezará a moverse hasta que las fuerzas verticales se equilibren, momento en el cual ésta alcanzará una velocidad constante llamada velocidad terminal de sedimentación.

$$\sum F = F_g - E - F_R \quad (3-6)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{4g(\rho_p - \rho_w)d_p}{3C_R\rho_w}} \quad (3-7)$$

Pero determinar el coeficiente de rozamiento, necesario para el cálculo de la velocidad de sedimentación, no es posible obtenerlo de forma teórica, tal y como explica John C. Crittenden (2012), es necesario hacerlo de forma empírica.

Este valor está relacionado con el el número de Reynolds, tal y como revela el análisis de los datos experimentales, y que se define de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\rho_w v_s d_p}{\mu} = \frac{v_s d_p}{\nu} \quad (3-8)$$

donde:

Re = número de Reynolds, adimensional

μ = viscosidad dinámica, N·s/m² o kg/m·s

ν = viscosidad cinemática, m²/s

Hay muchos estudios que han elaborado correlaciones empíricas entre las velocidades de sedimentación experimentales y el coeficiente de rozamiento. Éstas dependen principalmente de si el flujo objeto de estudio es laminar, turbulento o de transición entre ambos. En nuestro caso consideramos que, por los caudales y dimensiones del

decantador objeto de estudio, tendremos siempre un comportamiento laminar. En este estudio la velocidad de sedimentación de las partículas se ha calculado de forma experimental a partir de un ensayo de columna, para ser comparada con la carga hidráulica del decantador.

Si se aplica los conceptos explicados hasta ahora en un decantador ideal de forma rectangular, con entrada y salida en extremos opuestos y caudal constante, se puede hacer un análisis de qué partículas sedimentarán hasta el fondo del decantador y cuales no lo conseguirán. Esto dependerá principalmente de la velocidad del flujo, la velocidad de caída y de las dimensiones del decantador. Como vemos en la Figura 2 se puede establecer diferentes escenarios para una partícula, como la altura a la que entra en el sistema h_s , la velocidad del flujo v_f y la velocidad de sedimentación v_s , así como las dimensiones del decantador. En la Figura 2 se puede observar como en partículas con la misma velocidad de sedimentación, 1 y 3, la altura de entrada determinará si llegarán a sedimentar en el fondo o no. O como para una misma posición de entrada, partículas 1 y 2, el valor de la velocidad de sedimentación es la que determina el destino final de la partícula.

Para tener en cuenta todas estas variables y poder determinar las dimensiones y funcionamiento óptimo de un decantador es necesario establecer algunas premisas: que las partículas ya entran al sistema con velocidad de sedimentación terminal, que el flujo es constante, que solo llegaran a decantar si tocan el fondo del decantador antes de llegar al extremo opuesto a la entrada y que hay una concentración uniforme de partículas.

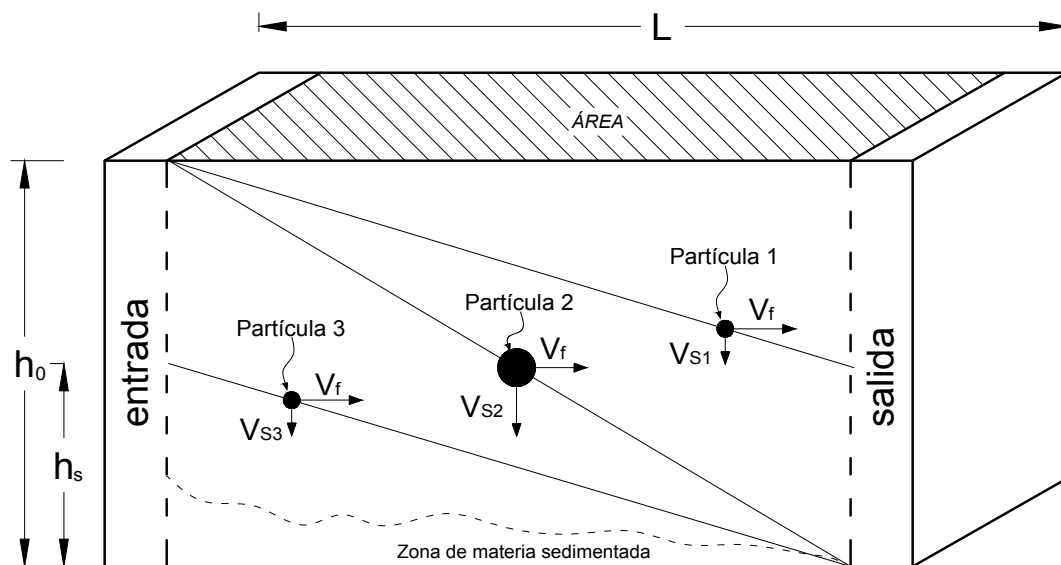


Figura 2: trayectoria de partículas discretas en decantador rectangular.

Al establecer v_f y v_s constantes, la trayectoria de la partícula es lineal. Cuando la trayectoria de una partícula que entra justo por la parte superior de la entrada llega al fondo justo antes de la salida, se dice que esta partícula tiene la velocidad crítica de sedimentación. Esta es la velocidad de sedimentación mínima necesaria que debe tener cualquier partícula para llegar al fondo antes de la salida, independientemente

de la altura a la que entre en el sedimentador. Esta velocidad de sedimentación crítica se puede expresar como

$$v_c = \frac{h_0}{\tau} \quad (3-9)$$

Donde:

v_c = velocidad crítica de sedimentación, m/h

h_0 = profundidad del sedimentador, m

τ = tiempo de retención hidráulica del sedimentador, h

Si en esta ecuación expresamos el tiempo de retención hidráulica del decantador como V/Q y el volumen como h_0A se obtiene la siguiente expresión

$$v_c = \frac{h_0}{\tau} = \frac{h_0Q}{h_0A} = \frac{Q}{S} \quad (3-10)$$

Donde:

V = volumen del decantador, m³

Q = caudal, m³/h

S = área o superficie del decantador, m²

El destino de las partículas con velocidad de sedimentación inferior a la crítica, dependerá de la altura a la que entren en el sedimentador y del valor de dicha velocidad. Como se puede ver en la Figura 2 las partículas 1 y 3, con la misma v_s inferior a v_c y por tanto con la misma trayectoria, no comparten el mismo final. Mientras que la partícula 3 entrando en el decantador a una altura h_s llega a tocar el fondo antes de salir del decantador, la 1 atravesará toda la zona de sedimentación y no llega a sedimentar, saliendo del sistema sin tocar fondo.

Se puede decir entonces que todas las partículas con la misma velocidad de sedimentación que la partícula 1 y que entren al decantador por debajo de la altura h_s también llegaran al fondo antes de salir del sistema.

Para poder determinar el porcentaje de partículas que llegan al fondo antes de salir del sistema se usará la expresión 3-11.

$$\% = \frac{h_s}{h_0} = \frac{h_s/\tau}{h_0/\tau} = \frac{v_s}{v_c} \quad (3-11)$$

Donde:

h_s = altura de la partícula desde el fondo del sedimentador, m

v_s = velocidad de sedimentación inferior a la v_c , m/h

De este modo, con las expresiones 3-10 y 3-11 se puede determinar la velocidad crítica de sedimentación con dos valores teóricos o de diseño, Q y S , y el porcentaje de materia sedimentada realizando varios ensayos de sedimentación para obtener el valor v_s .

3.2. Sedimentación floculenta

La sedimentación floculenta se distingue de la sedimentación discreta en que las partículas interaccionan entre ellas a lo largo del proceso. Como explica Vargas (2004), la sedimentación floculenta es aquella que produce la unión de partículas pequeñas para formar otras de mayor tamaño y peso, y por tanto aumentar la velocidad de sedimentación. Este aumento de tamaño se produce por dos causas principales. La primera es debida a la diferencia en la velocidad de sedimentación entre partículas, lo que hace que las de menor velocidad sean atrapadas por las de mayor, uniéndose a ellas y engordando el flóculo. La segunda es producida por los gradientes de velocidad del propio fluido que, al no ser perfectamente uniforme en toda la sección, crea flujos a diferentes velocidades dando lugar al arrastre de las partículas de los de menor velocidad por parte de los de mayor velocidad.

Durante este proceso, además de aumentar el tamaño de los flóculos, se produce un barrido de las partículas en suspensión más pequeña y difíciles de eliminar, lo que aumenta la eficiencia del sistema. El resultado es una agua de salida más clarificada y la posibilidad de reducir el tamaño del decantador, pero es importante tener en cuenta que para maximizar los efectos mencionados anteriormente, a diferencia de la sedimentación discreta, la profundidad en este caso es crucial, ya que el efecto de barrido incrementa con la distancia recorrida, engordando los flóculos y formando una estructura conjunta mayor. Finalmente esta estructura dará lugar a otro tipo de sedimentación, la zonal, que se explica en el punto siguiente 3.1.3.

Como explica John C. Crittenden (2012) las ecuaciones de floculación no han mostrado ser muy prácticas para el diseño de decantadores y éstos se basan principalmente en datos experimentales de columna donde se simula los tiempos de retención hidráulica reales y se miden los porcentajes de materia sedimentada en dicho tiempo. Comparando los tiempos de retención con los porcentajes de sedimentación se puede aproximar las dimensiones requeridas para un tipo de afluente.

3.3. Sedimentación zonal

Como se ha mencionado en el apartado anterior, la sedimentación zonal se puede entender como la continuación del proceso de sedimentación floculenta. En un principio la formación de flóculos hace que éstos vayan agregando partículas que los hacen crecer durante la sedimentación. A medida que este proceso avanza da lugar a una capa de partículas con una concentración mayor. Esto tiene una consecuencia directa en el comportamiento del fluido que se desplaza a causa del movimiento de las partículas. Cuando una partícula individual desciende el fluido puede desplazarse fácilmente alrededor de ella, generando poca fuerza de rozamiento. Pero cuando la concentración es lo suficientemente elevada, como en el caso de la sedimentación zonal, afecta al flujo que se desplaza a causa del movimiento descendiente de la capa de partículas, creando una interfase diferente partícula-agua donde la fuerza de rozamiento es mayor.

Para determinar el flujo de sólidos en suspensión en un decantador, se debe tener en cuenta el movimiento descendiente debido a la sedimentación por gravedad y el producido por la purga que se realiza para eliminar el material ya sedimentado en el fondo, que se puede expresar de la siguiente manera:

$$J_T = J_s + J_u \quad (3-12)$$

Donde:

J_T = Flujo total de sólidos, $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$

J_s = Flujo de sólidos debido a la sedimentación, $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$

J_u = Flujo de sólidos debido a la purga, $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$

Para determinar J_s se puede realizar un ensayo de columna, en el que se calculará la velocidad de sedimentación de una mezcla con concentración inicial homogénea e ir tomando valores de desplazamiento vertical en tiempos regulares. Si se realiza este ensayo variando la concentración inicial se obtiene una curva para cada valor de concentración, tal y como se muestra en el ejemplo de la Figura 3. Si se dice que v_s es el valor de la pendiente de cada curva en el primer tramo, donde la velocidad es mayor, y se representa estos valores en función de la concentración, se obtiene un gráfico como la de la Figura 4.

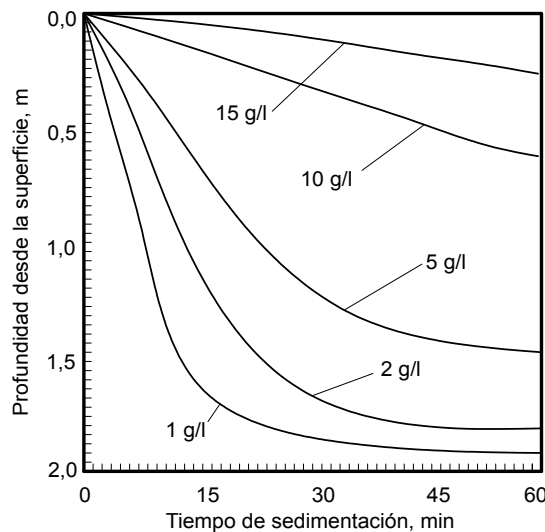


Figura 3: velocidad de sedimentación para diferentes concentraciones de sólidos.

Multiplicando cada velocidad por su concentración inicial, según la expresión 3-13, de manera que obtenga el valor del flujo de sólidos debido a la sedimentación para cada concentración, se podrá representar el gráfico de flujo que se muestra también en la Figura 4.

$$J_s = v_s C \quad (3-13)$$

Donde

v_s = velocidad de sedimentación para una concentración C , m/h

C = concentración de sólidos en suspensión, kg/m³

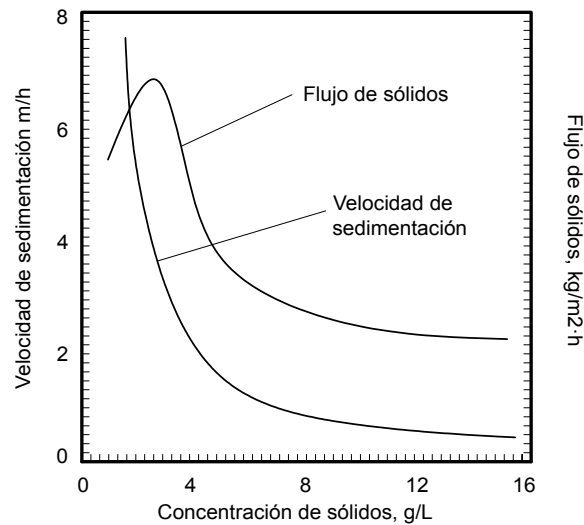


Figura 4: velocidad inicial de sedimentación y flujo de sólidos debido a la sedimentación en función de la concentración.

La línea de flujo representada en la Figura 4 comienza con un valor creciente hasta llegar a un valor máximo, a partir del cual desciende de con mayor pendiente que en el ascenso inicial. La primer fase de crecimiento puede explicarse a partir del aumento de concentración producido por el arrastre de partícula por parte de flóculos mayores y la capa formada en la sedimentación zonal. El cambio decreciente puede explicarse con el descenso de la velocidad de sedimentación, provocando así un menor flujo al aumentar la concentración.

El flujo de sólidos debido a la purga, J_u , se define fácilmente como:

$$J_u = \frac{Q_u C}{A} = v_u C \quad (3-14)$$

Donde

Q_u = caudal de purga, m³/h

A = sección transversal del decantador, m²

v_u = velocidad debido al flujo de purga, m/h

El flujo total a una concentración determinada C se puede escribir en términos de velocidad de sedimentación y de purga, substituyendo las fórmulas 3-13 y 3-14 en la expresión 3-15 obteniendo la ecuación:

$$J_T = (v_s + v_u) C \quad (3-15)$$

Se puede definir una tasa de flujo de partículas límite a la entrada de un decantador partir del cual, si aumenta dicha tasa, entrarían más partículas de las que saldrían. La

diferencia entre la entrada y la salida se iría acumulando dentro del decantador llegando a colmatar el sistema y por tanto su desbordamiento.

Para ello primero se debe elegir cual será la concentración que se desea obtener en la purga C_u , según los requisitos posteriores al proceso, y luego obtener el flujo de sólidos límite J_L para dicha concentración de purga. Tomando como ejemplo el Figura 5, donde se han graficado las curvas del flujo de sedimentación, el flujo de purga y el flujo total, a partir de valores experimentales realizados por John C. Crittenden (2012) en un ensayo de columna.

Prescindiendo de los valores numéricos, se observa que, para determinar el flujo límite, se puede trazar una recta desde el eje X en el valor de concentración de purga escogida por diseño y hacerla pasar por la tangente a la curva de flujo de sedimentación. La intersección de la línea tangente con el eje Y, será el valor de flujo de sólidos límite J_L para la curva de flujo de sedimentación de las partículas del afluente y la concentración de purga que se haya determinado. Además, si se traza una línea horizontal desde el valor de flujo límite en el eje Y hasta su intersección con la curva de flujo total, se obtiene el valor de concentración límite C_L con la que obtener dicho flujo límite.

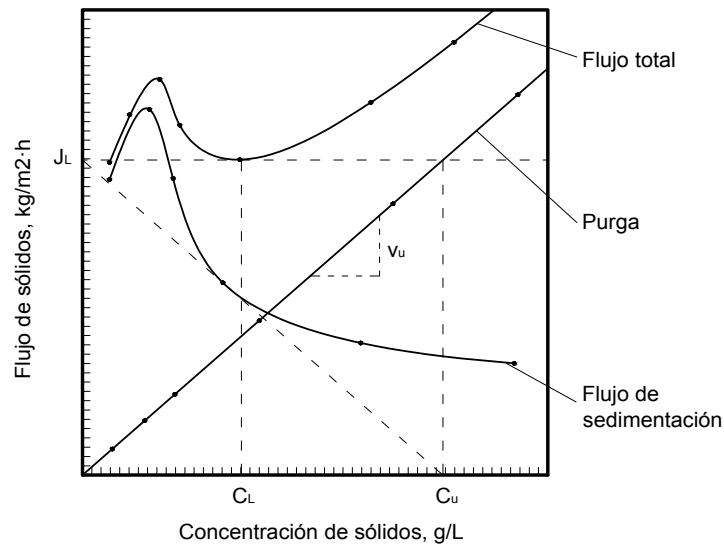


Figura 5: curvas de flujo debido a la sedimentación, purga y total en función de la concentración, para la determinación del flujo límite.

Así mismo la v_u puede determinarse calculando la pendiente de la recta que representa al flujo de purga, mediante el valor de J_L y C_u tal que

$$v_u = \frac{J_L}{C_u} \quad (3-16)$$

Donde:

J_L = flujo de sólidos límite, $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$

C_u = concentración de sólidos en la purga, kg/m^3

C_L = concentración límite, Kg/m^3

También se puede estimar el caudal de purga realizando un balance de masas, representado en la Figura 6, y desarrollado en la expresión

$$Q_i C_i = (Q_i - Q_u) C_e + Q_u C_u \quad (3-17)$$

Donde:

Q_i = caudal del afluente, m^3/h

C_i = concentración de sólidos suspendidos en el afluente, mg/L

Q_u = caudal de la purga, m^3/h

C_u = concentración de sólidos suspendidos en la purga, mg/L

C_e = concentración de sólidos suspendidos en el efluente, mg/L

Pero si el efluente está suficientemente clarificado, su concentración puede considerarse despreciable y por tanto queda la expresión

$$Q_u = \frac{Q_i C_i}{C_u} \quad (3-18)$$

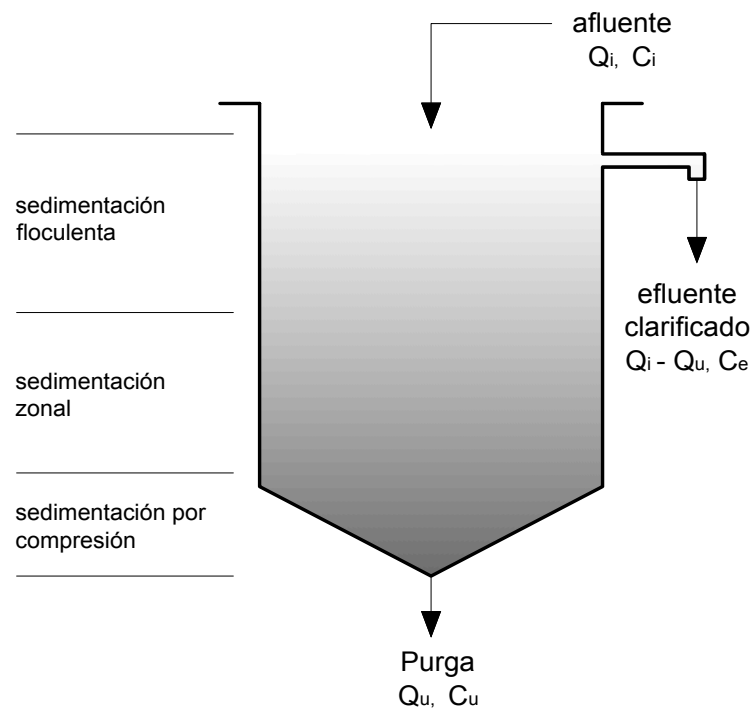


Figura 6: representación de balance de masas en decantador para afluente, purga y efluente.

Finalmente se podrá determinar la sección transversal necesaria para el decantador sustituyendo v_u por Q_u/A en la ecuación 3-16, de manera que se obtiene

$$A = \frac{Q_u C_u}{J_L} = \frac{Q_i C_i}{J_L} \quad (3-19)$$

El siguiente paso del proceso es la sedimentación por compresión, donde la concentración es lo suficientemente elevada como para que el peso de las partículas

influya en el proceso, comprimiendo el conjunto y desplazando agua hacia la parte superior. Las velocidades de sedimentación en esta zona son muy bajas y su comportamiento no se estudia en este trabajo, ya que la continuidad de las purgas en los ensayos realizados, dan lugar a tiempos de retención muy bajos en esta zona del decantador y por tanto la sedimentación por compresión es despreciable.

3.4. Sedimentación lamelar

Como se ha visto hasta ahora la superficie y la altura son factores cruciales en el rendimiento del proceso de decantación. Cuando se dispone de mayor superficie aumenta la cantidad de partículas que pueden sedimentar y cuanto menor es la altura del decantador la partícula emplea menos tiempo en llegar al fondo. Pero por otro lado el flóculo crece de tamaño durante su descenso, mejorando la clarificación, por lo que se requieren ciertas alturas de trabajo para este proceso.

Se puede decir entonces que, para un rendimiento elevado en la eliminación de partículas y clarificación del agua de salida en un tiempo lo más reducido posible, es necesaria una altura de sedimentación pequeña, una altura de floculación alta y todo ello en la mayor superficie posible. Sin embargo una gran superficie requiere de grandes espacios que no siempre están disponibles. Una distancia pequeña de sedimentación, o lo que es lo mismo una cota de agua baja, deriva en problemas a la hora de la eliminación de los sólidos sedimentados en el fondo y la clarificación de la parte superior, ya que habría una interfase entre ambas capa demasiado pequeña. Para poder llevar a cabo estas tres premisas es necesario separar el proceso de clarificación y el de extracción del material sedimentado.

Centrándose primero en el proceso de sedimentación y la reducción de la distancia que una partícula debe descender para llegar a tocar con una superficie, se puede pensar en extender el volumen de agua en una superficie mayor, pero si no se quiere requerir de grandes extensiones de terreno se puede disponer la misma superficie repetidamente en forma de placas una encima de la otra, según la Figura 7, donde el flujo irá pasado de un piso a otro a medida que los sólidos en suspensión van sedimentando en las diferentes capas.

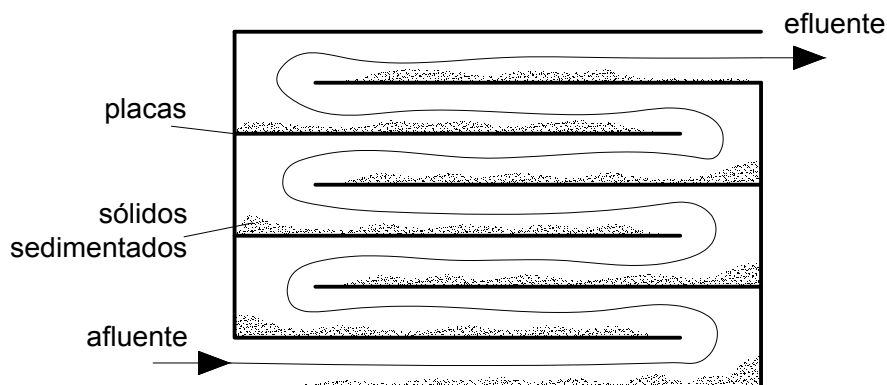


Figura 7: Sedimentador teórico de placas paralelas y horizontales para el aumento de superficie de sedimentación, con afluente inferior y efluente superior.

Sin embargo se plantean dos problemas para esta solución. El primero es la eliminación del material sedimentado. El segundo la reducción de la sección de paso del flujo a causa del sedimento acumulado, cosa que llevaría al aumento de velocidad en el paso del agua y provocaría el levantamiento de parte de los sólidos sedimentados, empeorando las condiciones de clarificación en el efluente.

Para solucionar el problema de la eliminación del material sedimentado se pueden disponer las placas con inclinación suficiente como para provocar el derrumbamiento del material a medida que se vaya acumulando en ellas. Posteriormente habrá que prever una zona en la parte inferior de las placas donde se deposite el material sedimentado y pueda ser purgado. Y finalmente será necesario un vertedero en la parte superior por donde poder evacuar el agua clarificada.

En este caso el comportamiento teórico de las partículas en un sistema de placas paralelas e inclinadas se puede representarlo según la Figura 8.

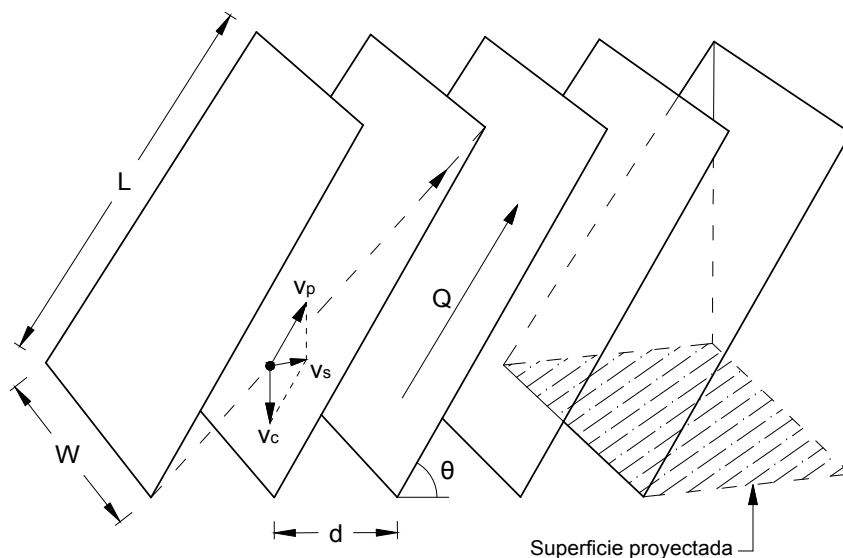


Figura 8: representación de un sistema de placas paralelas e inclinadas para el aumento de superficie de trabajo, así como la evacuación del material sedimentado.

Donde:

d = distancia entre placas, m

W = ancho de las placas, m

L = longitud de la placa, m

Q = caudal, m³/h

θ = ángulo de las placas respecto a la horizontal, °

v_p = velocidad de paso, m/s

v_c = velocidad de caída, m/s

v_s = velocidad de sedimentación, m/s

Como se puede ver, en este caso la velocidad de sedimentación no solo depende de la velocidad inducida por la gravedad, sino que es una resultante de las velocidades de caída y de paso.

Como muestra Saady (2011) con una visión de perfil de las placas, para analizar la geometría de sistema con triángulos rectángulos, se puede definir el comportamiento de la partícula, tal y como se expone en la Figura 9.

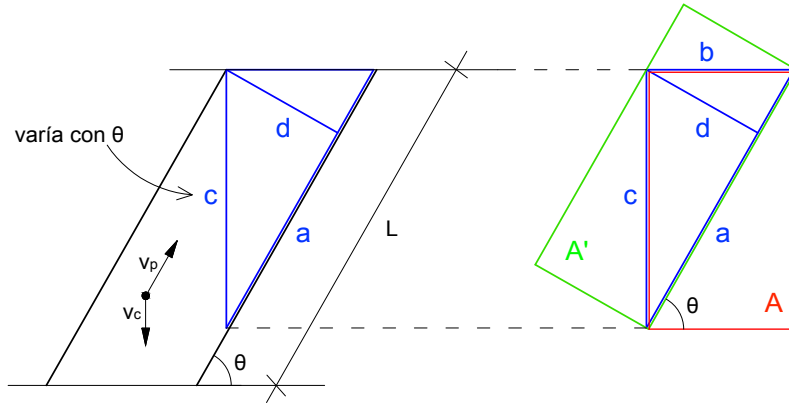


Figura 9: descomposición geométrica de placas paralelas e inclinadas.

Ahora la distancia de caída será la distancia c , que dependerá de la distancia entre placas y de la inclinación de las mismas. Se puede decir que, para una misma separación entre placas el ángulo de inclinación es quien determina la distancia de caída.

En primer lugar se aplica el teorema de la hipotenusa y la altura, donde las superficies A y A' son iguales y por tanto

$$A = A' \rightarrow \frac{bc}{2} = \frac{da}{2} \rightarrow c = \frac{a}{b}d = \frac{d}{b/a} = \frac{d}{\cos \theta} \quad (3-20)$$

Una vez definida c en función de la distancia entre placas, se puede expresar cual será el tiempo de caída en función de la velocidad de sedimentación, tal que

$$t_c = \frac{d/\cos \theta}{v_c} = \frac{d}{v_c \cos \theta} \quad (3-21)$$

La velocidad de paso será el caudal dividido por la superficie transversal al flujo

$$v_p = \frac{Q}{Wd} \quad (3-22)$$

y el tiempo de paso del fluido, desde que entra al sistema hasta que sale, será la longitud de la placa dividido por la velocidad de paso. Si se sustituye la ecuación 3-22 en la 3-23 no queda

$$t_p = \frac{L}{v_p} = \frac{LWd}{Q} \quad (3-23)$$

Para que una partícula llegue a sedimentar tocando la placa antes de que salga fuera del sistema, el tiempo de caída deberá ser menor al tiempo de paso. Por lo que se puede expresar como una desigualdad de las ecuaciones 3-21 y 3-23, de manera que se obtiene

$$t_c \leq t_p \rightarrow \frac{d}{v_c \cos \theta} \leq \frac{LWd}{Q} \rightarrow v_c \cos \theta \geq \frac{Q}{LW} \rightarrow v_c \geq \frac{Q}{S \cos \theta} \quad (3-24)$$

Donde:

S = superficie de la placa, m²

Como un sistema de este tipo siempre tendrá más de una placa para aumentar la eficiencia, se debe que multiplicar la superficie de la placa por el número de placas que se dispongan. De forma que quedará la siguiente expresión

$$v_c \geq \frac{Q}{n S \cos \theta} \quad (3-25)$$

Donde:

n = número de placas

Esta última expresión permite determinar las condiciones de trabajo de un decantador que funcione con sedimentación inclinada. Esto permite diseñar el decantador con la superficie necesaria para trabajar a un caudal determinado.

4. Alcance y límites del sistema estudiado.

Este trabajo se centra en la separación de biomasa y agua proveniente del cultivo de microalgas en tres fotobiorreactores tubulares instalados en el Parc Agrònom de la Universitat Politècnica de Catalunya, situado en Viladecans, donde se ubican las instalaciones del proyecto *INCOVER (Innovative Eco-Technologies for Resource Recovery from Wastewater) case study 1*. Se trata de un proyecto colaborativo financiado por la Comisión Europea en el marco del programa de Investigación e Innovación Horizonte 2020. Su objetivo es desarrollar tecnologías innovadoras y sostenibles de valor agregado para un tratamiento de aguas residuales basado en la recuperación de recursos, utilizando metodologías de monitoreo y control de operaciones inteligentes a escala de demostración.

En la Ilustración 1 se muestra la ubicación dentro del área metropolitana de Barcelona y la distribución sobre el terreno de los diferentes procesos del proyecto.

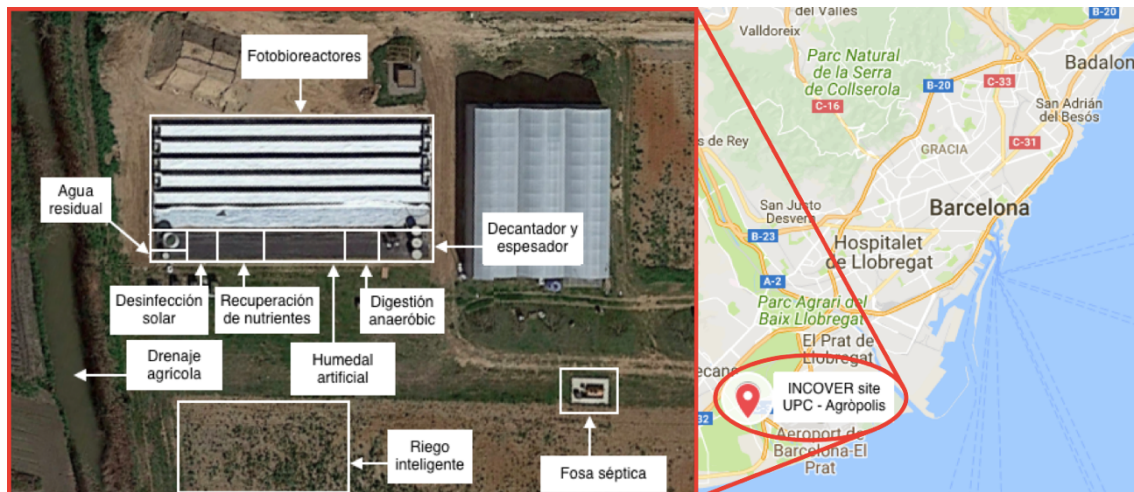


Ilustración 1: Ubicación de las instalaciones INCOVER case study 1 y distribución de los procesos del proyecto.

El objetivo del proyecto INCOVER case study 1 es realizar el conjunto de procesos necesarios para llevar a cabo un ciclo cerrado del agua, tal y como se muestra en la Figura 10. Empieza con el tratamiento de las aguas residuales y de drenaje agrícola en fotobiorreactores para producir un cultivo de microalgas. La mezcla de microalgas y agua pasa por un proceso de sedimentación en un decantador lamelar, compuesto por un floculador, un tranquilizador, una zona de lamela exagonales, un vertedero para la salida del agua clarificada y una zona de purga para evacuar la biomasa decantada. La biomasa y el agua clarificada toman caminos diferentes.

La biomasa pasa a unos espesadores para conseguir la concentración óptima, antes de entrar en un proceso de codigestión anaeróbica. En este proceso se produce biogás que se almacena en un gasómetro, y digestato que se lleva a un humedal artificial para ser rescatado y valorizado. Por otro lado, el agua clarificada pasa a una sistema de desinfección solar y posteriormente pasar por un sistema de recuperación de nutrientes. Finalmente el agua es llevada a un sistema de riego inteligente donde se cierra el ciclo.

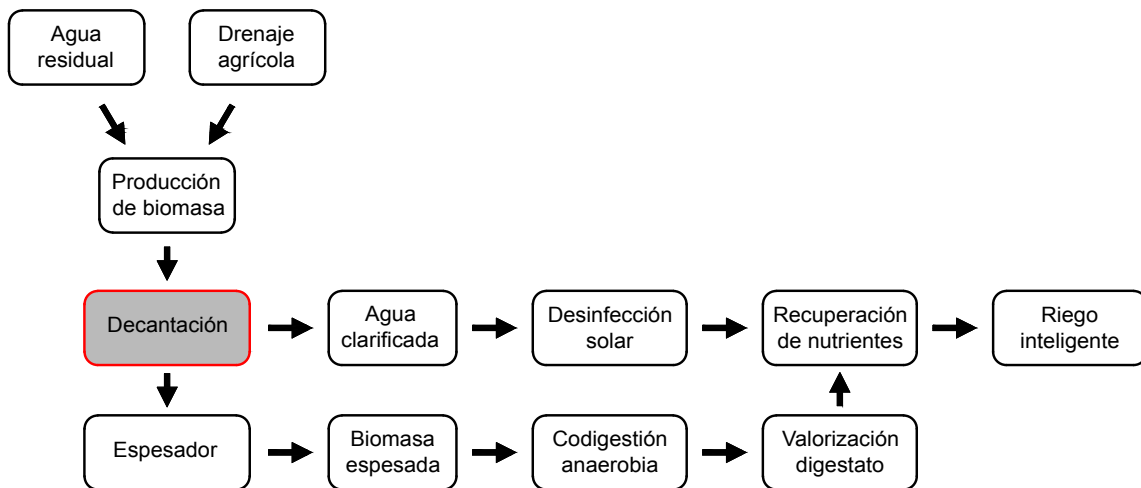


Figura 10: diagrama del conjunto de procesos al que pertenece el decantador objeto de estudio.

El proceso que se estudia en este trabajo es el de decantación, que empieza con la entrada del cultivo de microalgas proveniente de los fotobioreactores al decantador, y finaliza en las dos salidas de agua clarificada y biomasa sedimentada. En el decantador existen diferentes procesos que se explican en el apartado de materiales y métodos.

La Figura 11 muestra un plano en detalle, realizado por Vojtech Belohlav doctorando del proyecto INCOVER. En dicho plano se representan todos los procesos y elementos que lo componen. Cada elemento está representado con una simbología que se define en la tabla ajunta en el plano. Se han señalado los límites del sistema estudiado delimitando con línea discontinua todos los elemento que intervienen en el proceso de decantación.

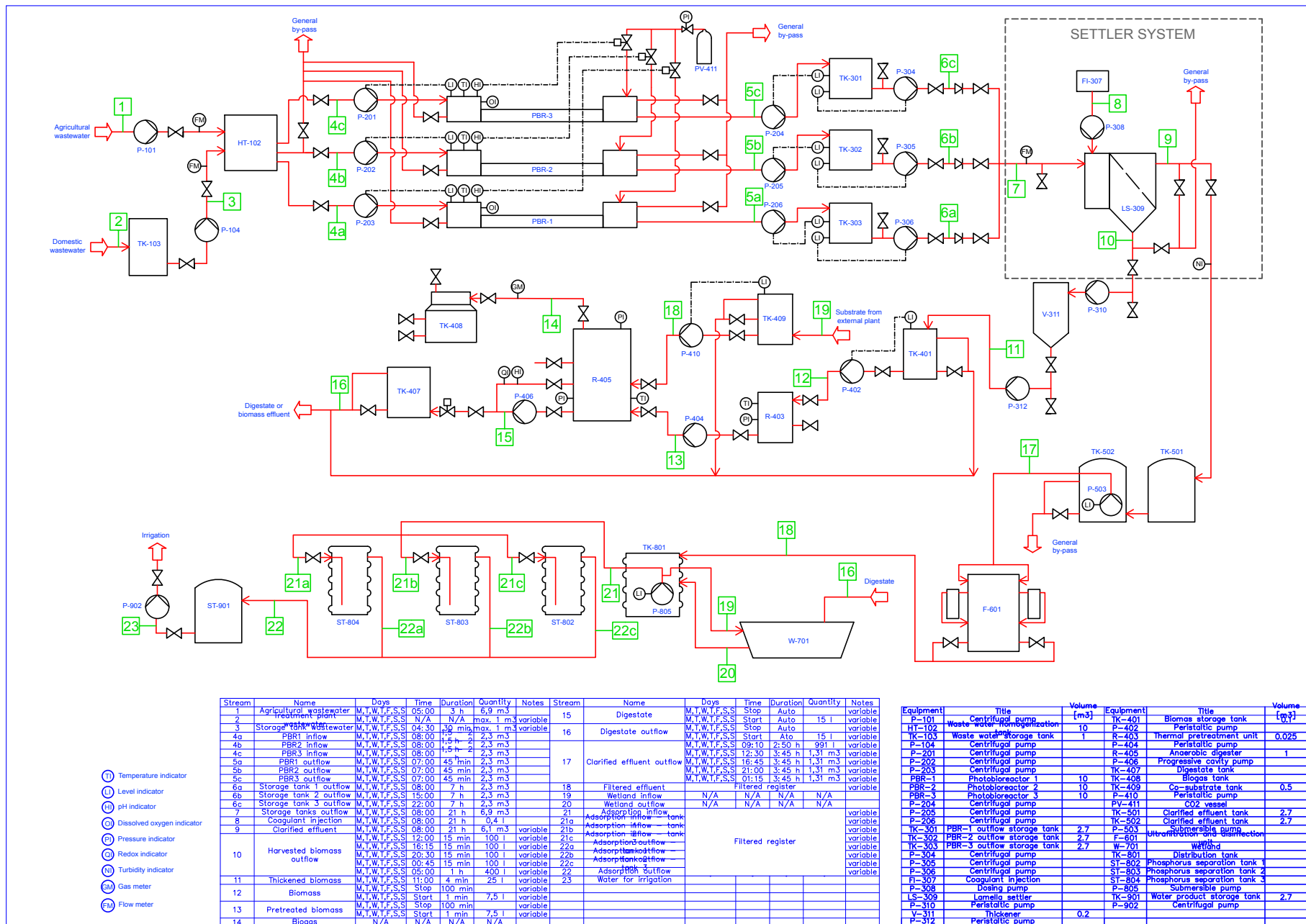


Figura 11: esquema detallado de los procesos del proyecto INCOVER donde se delimita con línea discontinua el proceso de decantación de estudio. Realizado por Vojtyech Belohlav.

5. Materiales y métodos

5.1. Decantador

El decantador objeto de estudio ha sido diseñado para la separación de la biomasa de un cultivo realizado en phobioreactores, donde se lleva a cabo el tratamiento de aguas residuales. Está construido en polipropileno en su totalidad, con uniones soldadas y dispone de cerramiento para unas condiciones de trabajo en ausencia de luz. En la Ilustración 2 se muestra en fotografía el alzado y planta, donde se puede distinguir las diferentes partes del mismo. En la planta, a tapa descubierta y de izquierda a derecha, se puede ver: el floculador con el agitador motorizado, la parte superior del tranquilizador y finalmente a la derecha la parte superior de la zona lamelar con el vertedero dentado en el eje central. En el alzado se puede apreciar la inclinación a 60° de la zona lamelar y en la parte inferior la delimitación horizontal de la zona de purga. Todo ello sobre un soporte de cuatro patas unidas mecánicamente sobre peana para dar mayor firmeza i estabilidad al conjunto.



Ilustración 2: Fotografía de alzado y planta del decantador lamelar para la separación de biomasa.

5.1.1. Características

El decantador, representado en la Figura 12, tiene un volumen de 700 litros y está compuesto de cinco partes integradas citadas a continuación en el sentido del flujo. Un floculador de 50 litros con agitación motorizada regulable. Un tranquilizador de 180 litros, un sistema de decantación lamelar de 350 litros, una zona de purga para la materia sedimentada de 120 litros y un vertedero superior para el agua clarificada.

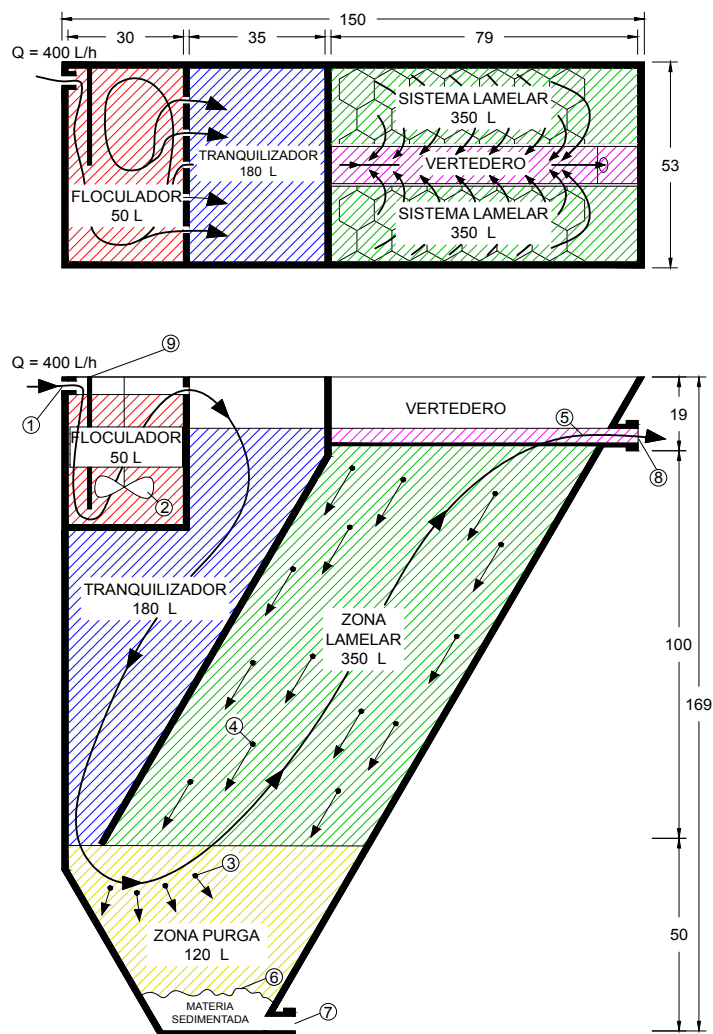


Figura 12: esquema de tránsito del flujo a través del decantador

El floculador consta de una entrada superior de 25 mm de diámetro y un deflector situado a 3 cm de distancia para evitar la aparición de flujos preferentes. Una entrada de 3 mm para la inyección del coagulante de policloruro de aluminio PAX-18, el cual se regula con un dosificador modelo Torres CE ECO-0208 y un sistema de agitación de hélice conectada a un motor DOSIM DGA-600-12, con velocidad regulable. A la salida, el floculador dispone de cinco orificios de 20 mm dispuestos horizontalmente, situados en la parte superior del lado opuesto a la entrada y que conectan directamente con el tranquilizador.

El tranquilizador tiene dos zonas diferenciadas. La primera, situada en la parte superior e inmediatamente después al floculador, donde desaparece la agitación y puede continuar el proceso de floculación y engordamiento de los flóculos iniciado en el floculador. La segunda, que está situada debajo de la primera, dispone de una cara inclinada 60° respecto a la vertical llegando hasta la zona de purga, con la intención de llevar dichos flóculos a la parte inferior del decantador, donde se encuentra la entrada a la zona lamelar.

Seguidamente se encuentra el zona lamelar, formada por un panel de lamelas en forma de hexágono de 5,2 centímetros de lado y 116 cm de largo. La inclinación del

panel es también de 60 grados respecto a la horizontal. Este panel cubre toda el área de salida del decantador desde la parte inferior hasta la superior, tal y como se observa en las Figuras 12 y 13.

La salida al vertedero está situada en la parte superior de la zona lamelar y consiste en un canal de 10 cm de ancho que dispone de un regulador de altura dentado.

La zona de purga está justo debajo de la zona lamelar y es la encargada de almacenar la biomasa sedimentada para más tarde realizar purgas por la salida inferior de 50 mm de la que dispone el decantador. Esta purga se realiza a con una bomba peristáltica marca Damova MP-8118.16, que reduce la sección de salida a 25 mm.

El coagulante utilizado es Pax-18, que es un coagulante de policloruro aluminio líquido de alto rendimiento El aluminio en PAX-18 está altamente cargado, lo que ofrece mayor rendimiento y así reducir el consumo. Su composición es:

Aluminio (AL)	$9,0 \pm 0,2\%$
Al_2O_3	$17,1 \pm 0,4\%$
Hierro (Fe)	$< 0,01\%$
pH	$0,9 \pm 0,3$
Material activo	3,33 moles/Kg
Viscosidad (25° C)	$30 \pm 5 \text{ cP}$
Punto de congelación	-20° C

5.1.2. Modo de operación

Tal y como puede verse en la Figura 12, el flujo procedente de los fotobioreactores se introduce por la entrada (1) al floculador, con un caudal constante de 400 L/h y un volumen total diario de 6900 litros, donde se encuentra con el deflector (9) y el coagulante PAX-18. El caudal de PAX-18 ha variado en función de los resultados obtenidos en los Jar-test realizados a lo largo del estudio. El tiempo de retención hidráulica (TRH) de la mezcla dentro del floculador es de 7 minutos y medio, con una agitación por hélice (2) de 85 rpm. Seguidamente pasa a la parte superior del tranquilizador, donde desaparece la agitación y se inicia la sedimentación floculenta. Aquí los flóculos se unen para formar otros de mayor tamaño, que descienden hasta la parte inferior, tanto por sedimentación como por movimiento del flujo. Este paso dura 27 minutos. Llegados a este punto, el flujo finaliza el paso por el tranquilizador y se dirige a la zona lamelar, pero no antes sin hacer un pequeño tránsito por la parte superior de la zona de purga. En este paso una parte de las partículas (3) decantan directamente hasta el fondo de decantador (6) y la otra inicia su paso por la zona lamelar, donde tendrán un TRH de 52 minutos y medio. Al entrar en el zona lamelar, las partículas (4) se encuentran con una cantidad de superficie mucho mayor en la que sedimentar, y al acumularse los flóculos en dicha superficie se deslizan hasta la zona de purga, debido a su aumento de volumen y peso y de la inclinación de 60° respecto a la horizontal. En el zona lamelar es donde se da la separación de las partículas (4) y del agua (5) mediante sedimentación zonal. Las partículas se desplazan hasta el fondo (6), en él se inicia un nuevo tipo de sedimentación, por compresión, que no se estudia en este trabajo, pero cuyo valor dependerá del TRH en esta zona. Para el tránsito por la zona de purga el THR será de 18 minutos, pero el THR del fango vendrá determinado por la distribución de las purgas (7). Éstas han sido programadas siempre cada 2 horas, variando el volumen extraído en función de la demanda. Como el volumen total de agua tratada es de 6900 litros y el caudal de trabajo de 400 l/h, el tiempo total de funcionamiento diario del decantador es de 17 horas y 15 minutos. Como se ha tratado agua de tres fotobioreactores diferentes a lo largo del día, y por tanto para cada reactor se necesitan 7 horas de funcionamiento, las purgas se han distribuido en tres para cada reactor, dos cada dos horas desde el inicio y la tercera diez minutos antes de finalizar. Por lo que se obtienen dos purgas en un intervalo de 2 horas y una al final con un intervalo de 2 horas y 50 minutos.

Finalmente el agua clarificada libre continúa su camino ascendente por las lamelas hasta la salida dentada, o vertedero, llegando al canal y saliendo del sistema por la abertura superior de 50 mm (8). En la Tabla 1 se resumen los volúmenes, tiempos de retención, caudales y características de los elementos que conforman el proceso de decantación.

Tabla 1: condiciones de trabajo del decantador.

	Volumen, L	TRH, min		Ø	Q, L/h
Floculador	50	7,5	Entrada (1)	25	400
Tranquilizador	180	27	Dosificador	3	1,2
Zona lamelar (4)	350	52	Salida de purga	50	0,5
Zona de purga (6)	120	18-120-150	Salida de vertedero	50	400 -purga
Vertedero	0	0	Desagüe	50	6 a 15
Depósito PAX	100	5-10 días	Agitador (2)	20 cm	85 rpm

5.2 – Ensayos realizados

Para el estudio del comportamiento del decantador, se han realizado diversos ensayos durante 4 meses, del 19/12/2017 al 27/04/2018, con la finalidad del correcto funcionamiento de las diferentes partes que componen el decantador. A continuación se exponen cada uno de ellos, cual ha sido su procedimiento de ejecución y con que finalidad.

5.2.1. Jar-test

En primer lugar se han realizado ensayos de Jar-test para definir un punto de partida en cuanto a la dosificación del coagulante (policloruro de aluminio, PAX). Este Jar-test se ha realizado con seis recipientes de 500 mL cada uno, un mezclador por hélices con velocidad regulable y temporizador de funcionamiento.

En el floculador, el flujo se encuentra con un deflector a unos 3 centímetros justo a la entrada, donde se produce unas condiciones de flujo muy turbulento. Posteriormente pasa a la zona central donde se somete a una agitación a bajas revoluciones. Aquí el tiempo de retención es de 7 minutos y medio antes de pasar al tranquilizador. Para reproducir estas condiciones en el ensayo de jar-test, el procedimiento ha sido el siguiente:

- En primer lugar los recipientes con 500 mL de agua procedente del photobioreactor, se encuentran en agitación a 120 rpm.
- Se inyectan las diferentes concentraciones de coagulante, entre 2 y 20 mg Al^{3+} /L. PON SIEMPRE QUE ES ALUMINIO
- Se deja tres segundos con agitación a 120 rpm, para reproducir el efecto del deflector.
- Posteriormente la agitación se baja a 25 rpm durante 7 minutos y medio para reproducir las condiciones en la parte central del floculador. Se disminuyen las rpm ya que el volumen del recipiente es mucho menor que el del floculador, y si se realiza el experimento a 85 rpm las condiciones dentro del recipiente serían diferentes a las del floculador. (que et sembla així?)
- Una vez pasados los 7 minutos y medio, se para la agitación y se deja en reposo durante 15 minutos.
- Después de los 15 minutos de reposo se mide la turbidez del sobrenadante de cada uno de los recipientes.

De esta manera se comprueba la dosificación óptima en función de la clarificación del agua con la dosis mínima de coagulante. En la Ilustración 3 se muestra un ejemplo de ensayo en el momento de paro de la agitación, donde se aprecia una floculación óptima en el segundo recipiente desde la derecha.

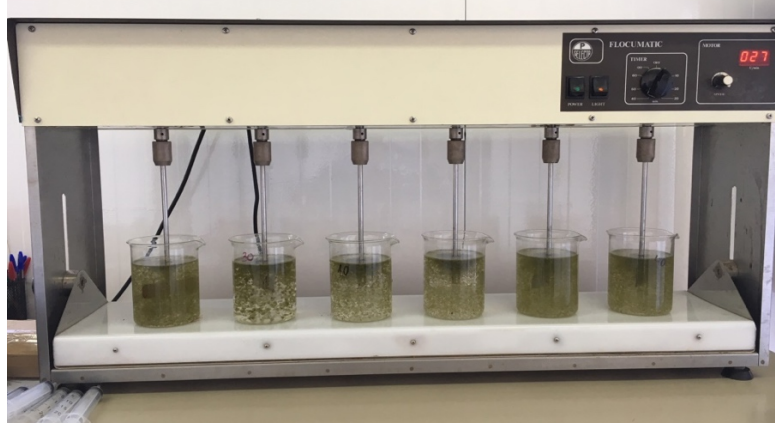


Ilustración 3: jar-test realizado in-situ a partir de una muestra de entrada a decantador.

5.2.2. Test de sedimentación V_{30}

Para estudiar cómo la floculación influye en el proceso de sedimentación de la biomasa, se han realizado ensayos de columna donde se ha tomado una muestra de 1 litro directamente del floculador. Posteriormente se ha introducido en una probeta de 35 cm de altura y de 1 L, y se ha guardado en nevera en ausencia de luz durante 30 minutos. Una vez transcurrido este tiempo se ha procedido de la siguiente manera:

- Se ha tomado una muestra del sobrenadante y se han medido la turbidez y el pH.
- Se ha anotado el volumen ocupado por la biomasa sedimentada en los 30 minutos.
- Se ha separado manualmente el sobrenadante de la biomasa y se ha vuelto a anotar el volumen restante en la probeta, ya que el procedimiento manual no permite realizar una separación con total exactitud.
- Posteriormente se ha realizado un análisis de la concentración de sólidos en el volumen restante, utilizando crisoles de 10 ml y eliminación de agua en estufa a 100 °C durante 24 horas. Finalmente para determinar el peso en seco se ha utilizado una balanza con precisión de 10^{-4} gramos.

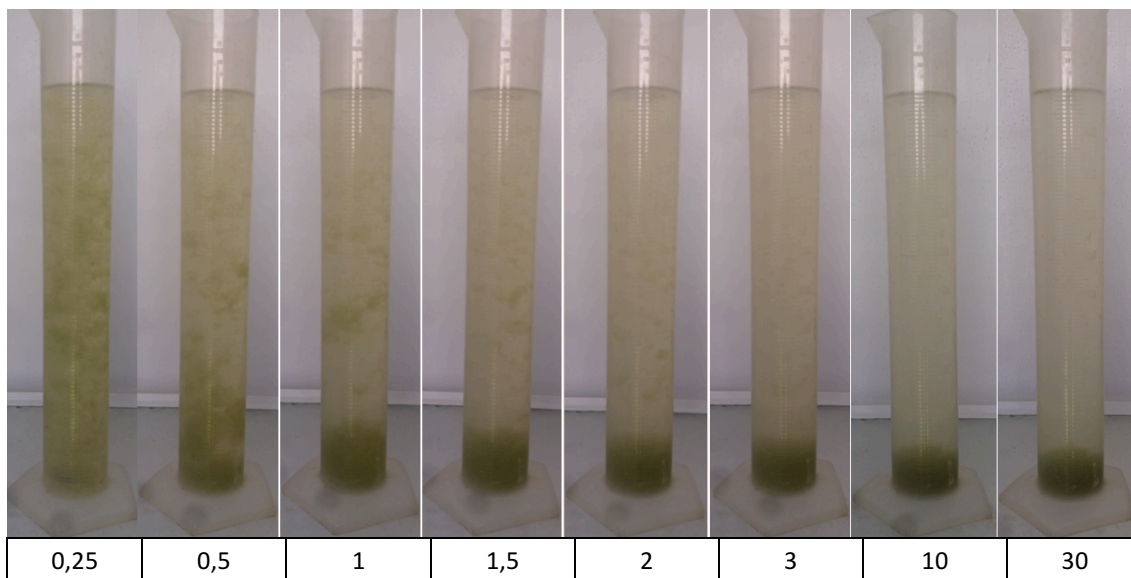


Ilustración 4: Proceso de sedimentación en test V3 realizado en probeta de 1 litro y 35 cm de altura. Tiempos expresados en minutos.

En la Ilustración 4 se muestra el proceso de sedimentación durante el test V_{30} mostrando el estado del proceso a lo largo de los 30 minutos de duración. Debajo de cada fotografía se han indicado los valores de tiempo de sedimentación expresados en minutos.

Como vemos la mayor parte de la sedimentación se produce en los dos primeros minutos, coincidiendo con los resultados del test de velocidad mostrados más adelante en el apartado 6.1.

5.2.3. Test de velocidad de caída

Para determinar la velocidad de sedimentación se ha realizado un ensayo de columna con probeta de 1 litro de 35 cm, de igual manera que en la Ilustración 4. Se ha tomado una muestra del floculador y se ha medido el tiempo de descenso de una partícula, situada en la parte superior, cada 3,5 cm de caída. De esta manera se ha podido comparar esta velocidad con la carga hidráulica del decantador.

5.2.4. Turbidez y pH

Se ha tomado la turbidez, con un medidor HANNA-HI-93703, y el pH, con un medidor HACH-LANGE-sensION, en la entrada al decantador, en el sobrenadante del ensayo V_{30} y en el agua clarificada a la salida, con la intención de establecer una relación entre la turbidez y pH de entrada, dosis de coagulante y turbidez y pH de salida.

5.2.5. Test de purga

Como ya se ha mencionado anteriormente en el apartado 5.1.2, el caudal de agua tratada en el decantador es de 6900 litros/día a un caudal constante de 400 L/h, por lo que el funcionamiento diario del decantador es de 17 horas y 15 minutos. La programación de las purgas ha sido siempre entre intervalos de tiempo de 2 horas con

caudal variable en función de la demanda. Estas purgas se han realizado con una bomba peristáltica igual a la de entrada, y un caudal de purga también de 400 L/h y $\frac{3}{4}$ de pulgada de sección en la salida. Las muestras se han tomado siempre en la segunda purga, a las 4 horas de funcionamiento, de manera que el muestreo a lo largo del estudio se ha realizado siempre en las mismas condiciones de trabajo.

Cada purga individual ha variado entre los 6 y 30 litros según la demanda, que al ser purgados a un caudal de 400 l/h, se han realizado en rangos de tiempo de entre 3 y 5 minutos de purga, dando lugar a volúmenes diarios de entre 60 y 300 litros.

Para el test de purga se ha tomado una muestra de 50 mL, cada 15 segundos para las purgas de durada 3 minutos y cada 30 segundos para las de 5 minutos de durada. De esta manera se ha obteniendo un muestreo continuo del efluente purgado. Posteriormente se han dispuesto los recipientes de muestreo, ordenados cronológicamente, en nevera y ausencia de luz durante 30 minutos y se ha tomado fotografía para obtener un resultado visual del comportamiento de la purga. Se han tomado como correctos los litros de purga cuyos recipientes contenían a partir de un cuarto de volumen de microalgas sedimentadas. En la Ilustración 5 se muestra un ejemplo donde se ha tomado como purga válida los 8 primeros recipientes que, al estar tomados con una diferencia de 15 segundos, corresponde a 2 minutos de funcionamiento de la bomba. Como el caudal de la bomba de purga es de 400 L/h, que equivale a 6,6 L/min, se obtiene que en este caso la purga óptima es de 13,2 litros.

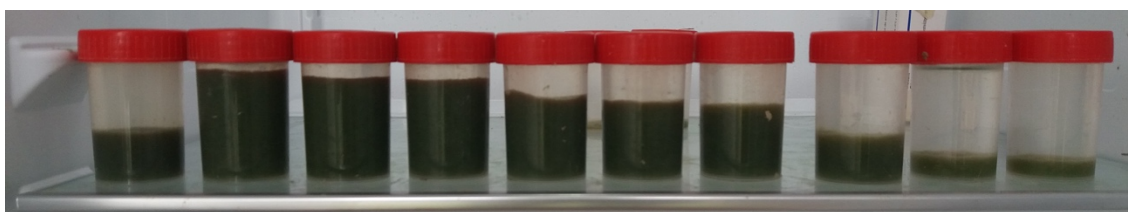


Ilustración 5: test de purga realizado para 16 litros de purga en dos horas de funcionamiento del decantador.

El siguiente paso ha sido obtener la concentración de sólidos totales en el volumen total de purga, por lo que se ha procedido a la mezcla de todos los recipientes y se ha toma una muestra. Para la obtención del valor de sólidos totales se ha utilizado crisol de 10 mL, balanza con precisión de 10^{-4} gramos y se a eliminado la humedad a 100 °C durante 24 horas.

Una vez obtenidos los valores de sólidos totales de la mezcla de todo el volumen, se ha calculado la concentración en los litros de purga óptimos a partir de la diferencia de volúmenes.

5.2.6. Test de purga pulsante

Para el test de purga pulsante se ha utilizado el desagüe del decantador de 1 pulgada y media de diámetro, con el que se obtiene un caudal a obertura libre de 2 litros/segundo. Este caudal, que ha sido calculado con un medidor por ultrasonidos modelo FLEXIM UMFLUXUS_F6V4-0EN, que proporciona un aumento de caudal repentino que favorece el descenso de la biomasa acumulada por encima de la zona de

purga. El procedimiento del ensayo ha durado 5 días, en los que se ha procedido de la siguiente manera:

- El primer día se ha realizado el test de purga diario de 20 litros a 400L/h a través del conducto de $\frac{3}{4}$ de pulgada. Dicha purga dura 3 minutos y se han tomado 12 muestras de 50 mL, una cada 15 segundos. Pero en este caso se han duplicado las muestras tomadas en los tiempo de 1,2 y 3 minutos.
- En este punto comienzan los 5 ensayos, realizados en cinco días a la misma hora, con la intención de que todos ellos sean igual de representativos. El procedimiento de los diferentes ensayos ha sido el siguiente:

- Ensayo 1

- Una vez finalizado el primer test se ha continuado purgando al mismo caudal y por el mismo conducto de $\frac{3}{4}$ de pulgada hasta los 66 litros, tomando una muestra de 50 mL cada minuto.

- Ensayo 2

- Se ha continuado purgando hasta los 66 litros como en el ensayo 1, pero en este caso se ha abierto el desagüe de $1 \frac{1}{2}$ pulgadas cada minuto durante 5 segundos y se han tomado muestras de 50 mL cada minuto.

- Ensayo 3

- Se continúa purgando hasta los 66 litros, y se abre el desagüe cada 30 segundos durante 3 segundos. Se toman las muestras de 50 ml cada minuto.

- Ensayo 4

- Se continúa purgando hasta los 66 litros, y se abre el desagüe cada 15 segundos durante 3 segundos. Se toman las muestras de 50 mL cada minuto.

- Ensayo 5

- Se continúa purgando hasta los 66 litros, y se abre el desagüe cada 30 segundos durante 5 segundos. Se toman las muestras de 50 ml cada minuto.

- Posteriormente a cada ensayo se han guardado las muestras en condiciones de reposo y ausencia de luz durante 30 minutos y se ha realizado fotografía para la comprobación visual.
- Finalmente se ha procedido a la mezcla de los dos muestreos por separado y se han medido los sólidos totales mediante 10 ml de la muestra mezclada usando crisol y estufa a 100 °C durante 24 horas.

En la Tabla 2 se muestra el procedimiento de los cinco ensayos y los datos obtenidos en cada uno de ellos:

Tabla 2: Ensayos realizados en las pruebas de purga pulsante.

Ensayo	Purga			Pulsante			
	Purga, L	ST (g/L)	Biomasa (g)	pulsos	purga test (L)	ST(g/L)	biomasa (g)
1	13	13,37	173,80	sin puls	66,00	3,31	218,46
2	13	15,65	203,40	5s/min	66,00	12,05	795,30
3	10	13,50	135,00	3/30s	66,00	9,40	620,40
4	20	21,90	262,80	3s/15s	66,00	18,55	1224,30
5	20	8,93	120,60	5s/30s	66,00	8,11	535,26

6 – Resultados y discusión

6.1 – Resultados Jar-test

Para el funcionamiento del decantador se han realizado diferentes Jar-test a lo largo del estudio, con la intención de obtener la menor turbidez a la salida del decantador. Para conseguir una dosificación equilibrada con las demandas de agua clarificada en la salida del decantador, en los ensayos de Jar-test se ha tomado el valor más bajo de dosis con el que se obtenía un sobrenadante por debajo de 5 NTU, a pesar de conseguir sobrenadantes más clarificados con dosis más altas.

Con este criterio se ha operado el decantador durante 4 meses, en los que la turbidez de entrada a variado notablemente. Esto ha sido debido a como las condiciones de luz solar y temperatura influyen en el crecimiento de la biomasa dentro de los fotobioreactores. En estas condiciones de cambio de turbidez se han podido estudiar las necesidades de coagulante para el correcto funcionamiento del decantador, previa regulación de los caudales de entrada y velocidades de agitación. El procedimiento ha sido la realización de Jar-test y la regulación de la dosificación de coagulante, observando la turbidez de salida durante varios días hasta obtener un valor de turbidez de salida del decantador también por debajo de 5 NTU. Esta operación se muestra en el Gráfico 1.

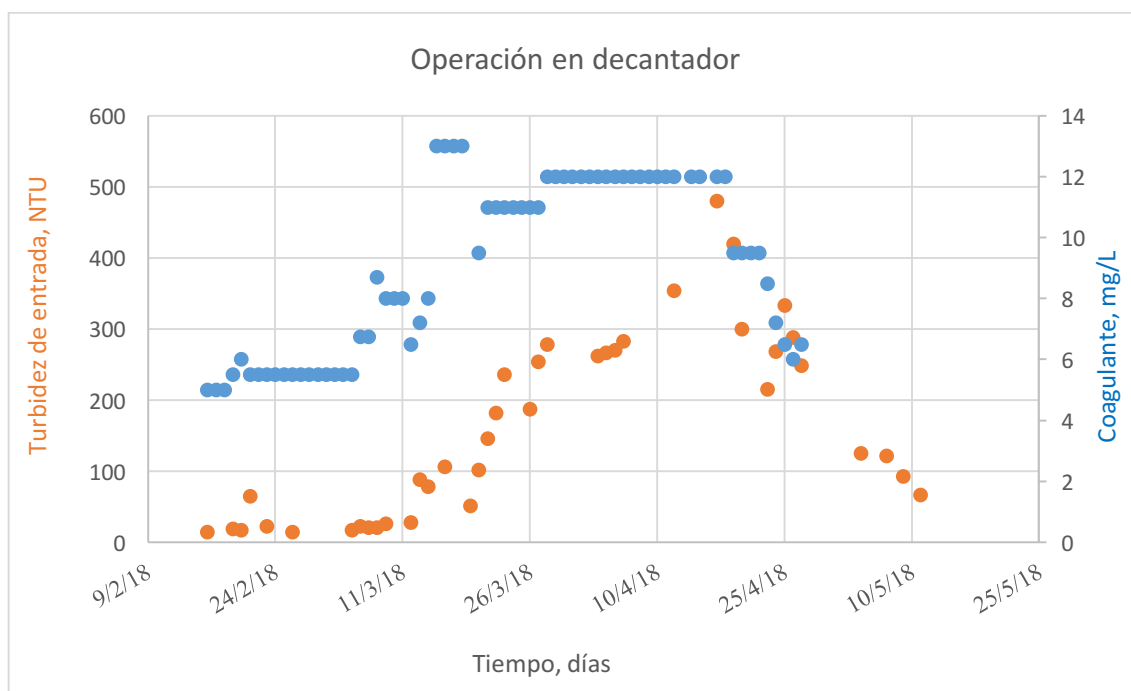


Gráfico 1: condiciones de trabajo de dosificación de coagulante y turbidez de entrada.

La intención es la de obtener una relación entre la turbidez de entrada y la dosis óptima para conseguir una turbidez inferior a 5 NTU a la salida del decantador. De esta manera se podrá operar la parte de floculación sólo en función de la turbidez de entrada, un valor mucho más sencillo y rápido de obtener que, con una pequeña muestra y un turbidímetro, puede llevar apenas un minuto. Mientras que para la

realización del Jar-test es necesario el equipo , material de laboratorio y al menos 45 minutos para todo el proceso.

Para el análisis de los datos, se han tomado 6 de entre los 40 obtenidos durante los 4 meses de estudio. Estos seis datos están en un rango de turbidez de 14-480 NTU y entre 5-12 mg/L para la dosificación de coagulante. Estos seis valores han sido elegidos por obtener con ellos una clarificación a la salida del decantador por debajo de 2,5 NTU. De esta manera se pretende obtener una relación de aquellos casos que han dado mejores resultados.

Si representamos los valores de dosis óptima en función de la turbidez de entrada, tal y como se muestra en el Gráfico 2, observamos que aparecen dos relaciones bien diferenciadas, una para los valores de turbidez comprendidos entre 0-20 NTU y otra para valores entre 20-500, el máximo alcanzado en la operación del decantador. Las dos tendencias se pueden aproximar a una recta con una regresión lineal con un R^2 de casi 1 para el rango de 0-20 NTU y de 0,8 para el de 20-500 NTU.

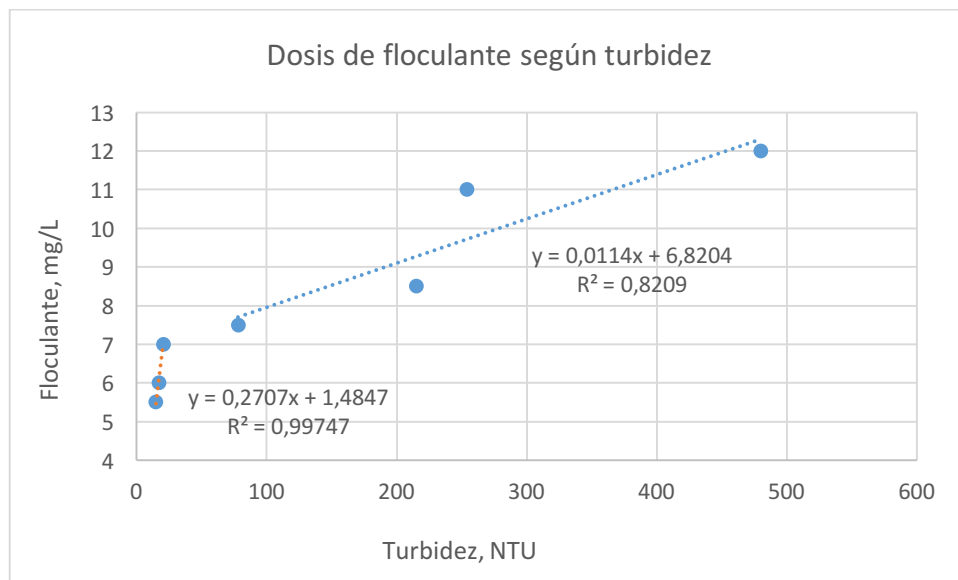


Gráfico 2: dosificación de coagulante en función de la turbidez.

Para el primer rango de valores, de 0-20 UTN, la recta de regresión lineal y su R^2 es:

$$y = 0,2707x + 1,4847$$

$$R^2 = 0,99747$$

y para el segundo rango, de 20-500 UTN, es:

$$y = 0,0114x + 6,8204$$

$$R^2 = 0,8209$$

Donde:

x = turbidez de entrada al decantador, NTU

y = dosificación de coagulante, mg/L

Con estos resultados se puede aproximar la dosificación en función de la turbidez, facilitando las operaciones de trabajo del decantador.

Se observa que en los rangos bajos de turbidez la demanda de coagulante aumenta significativamente más rápido con la subida de la turbidez, pero al llegar a valores superiores a los 20 NTU, la dosificación de coagulante necesaria incrementa de manera mucho más suave.

Durante la realización de los análisis se ha comprobado que a valores bajos de turbidez, es más difícil conseguir una clarificación adecuada, ya que en la floculación se generan flóculos de poco tamaño, y por tanto velocidades de sedimentación menores. Sin embargo, cuando la turbidez sube por encima de los 20 NTU, los flóculos que se forman alcanzan tamaños mayores, y que ayudan a barrer otros flóculos más pequeños, tal y como se explica en los apartados 3.1.2 y 3.1.3, requiriendo así una dosis de coagulante menor en proporción a las de rango de turbidez bajo. Sin embargo una turbidez por debajo de 20 NTU es inusual y solo se da en condiciones excepcionales de bajas temperaturas.

6.2. Carga hidráulica

En primer lugar se ha realizado un análisis de las características del decantador en cuanto a la carga hidráulica con la que opera. Tal y como se ha citado en el apartado 5.1.1 y Tabla 1, si se observan los valores de volúmenes y tiempos de retención de cada uno de los compartimentos, se observa que el factor limitante de este decantador es el floculador, ya que, teniendo un volumen de 50 litros se debe trabajar con caudales de hasta 500 litros/hora, aunque el tiempo de retención para el proceso de floculación debería ser de al menos 15 minutos. Anteriormente a la toma de datos para este trabajo, se comprobó que trabajar con caudales de 1 m³/h no resultó apropiado, ya que las partículas llegaban al tranquilizador sin apenas flocular, dando lugar a problemas en el proceso de sedimentación en la zona lamelar.

Para el cálculo de la carga hidráulica se ha utilizado la expresión desarrollada en el apartado 3.1.4 y las dimensiones del decantador representadas en la Figura 14. En ella se ha determinado que la superficie de decantación es la proyección de cada lamela individualmente donde los laterales del hexágono que son oblicuos, son proyectados en la horizontal, así como la inclinación de la lamela propiamente.

De este modo se puede calcular la carga hidráulica según la expresión 3-25, pero en este caso se tiene en cuenta, además de la superficie de las lamelas, la superficie del fondo, ya que también es superficie útil de sedimentación. Entonces la expresión 3-25 quedará

$$v_c \geq \frac{Q}{n S \cos \theta + S'}$$

i por tanto el cálculo será

$$v_c \geq \frac{0,4}{(39 \times 1,16 \times 0,104 \times \cos 60) + (0,5 \times 1,24)} = 0,135 \text{ m/h}$$

Donde:

S' = superficie de fondo del decantador

$$\cos \theta = \arctg \left(\frac{100}{59} \right) = \cos 60$$

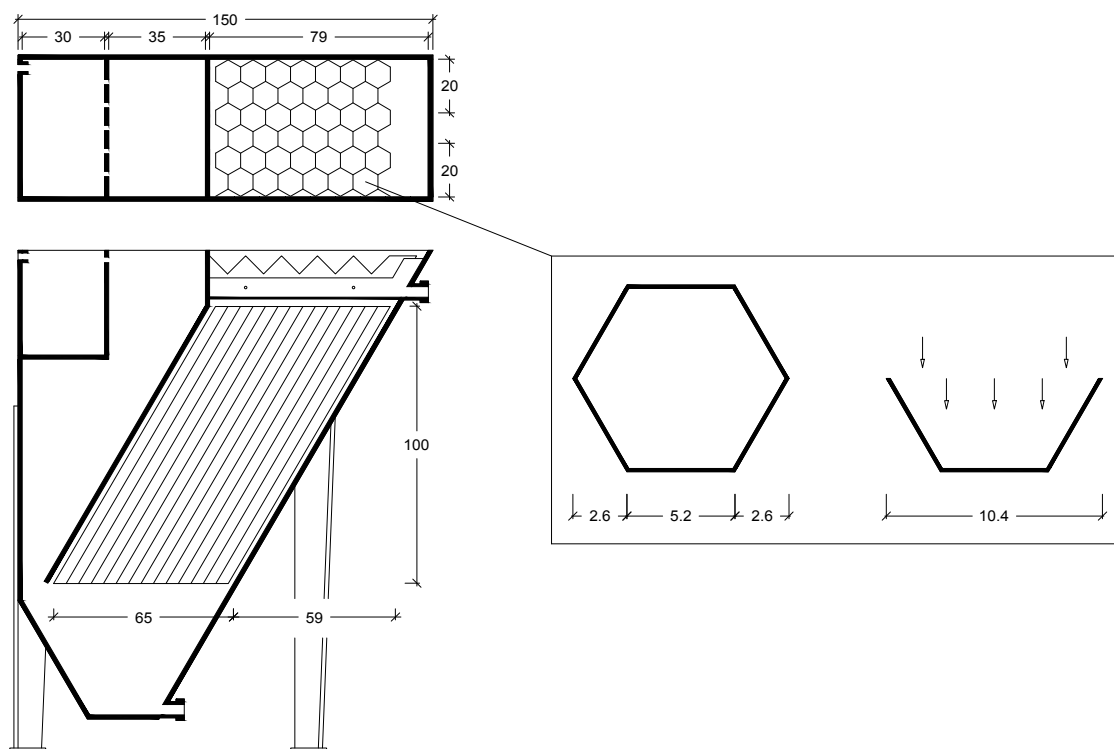


Figura 14: medidas de decantador y proyección de lamela para el calcula de la carga hidráulica.

De este modo se puede determinar que la velocidad crítica para que los flóculos sedimenten es de 0,135 m/h. Para la comprobación de dicho valor con la velocidad real de sedimentación de los flóculos, se han realizado ensayos de columna como el definido en el apartado 5.2.3, a diferentes concentraciones.

En los Gráficos 3 y 4, se muestran los resultados de dos ensayos con concentraciones de sólidos totales de 0,56 y 0,05 g/L respectivamente. En ellos se puede observar como la concentración determina la velocidad de sedimentación del conjunto de flóculos. Esta velocidad está calculada con los nueve primeros valores, los cuales representan la velocidad terminal de sedimentación. Tienen una desviación estándar de 0,096 en ambos casos y una R^2 de 0,90 para la concentración de 0,56 g/L y 0,97 para 0,05 g/L.

Los resultados son de 17,1 m/h para una concentración de 0,56 g/L y 6,1 m/h para 0,05 g/L. Esto no coincide con la tendencia expuesta en la Figura 4 del apartado 3.1.3 donde a mayor concentración las velocidades disminuyen. Pero hay que tener en cuenta que dicha Figura representa un rango de valores de concentración de microalgas de 1 a 15 g/l. En nuestro caso, al estar en un rango de concentración por debajo de 1 g/L, a mayor concentración mayor es la formación y engorde de los flóculos, que ganan peso y por tato aumenta la velocidad de sedimentación. Se puede decir por tanto que para la sedimentación floculenta el aumento de la concentración favorece la velocidad de sedimentación de las partículas.

Si se comparan los valores obtenidos en los ensayos de columna con la carga hidráulica calculada para nuestro decantador se puede concluir que está trabajando muy por debajo de su capacidad de 0,135 m/h. Efectivamente el factor limitante es el tamaño

del floculador, con un tiempo de retención demasiado bajo si se aumenta el caudal de trabajo.

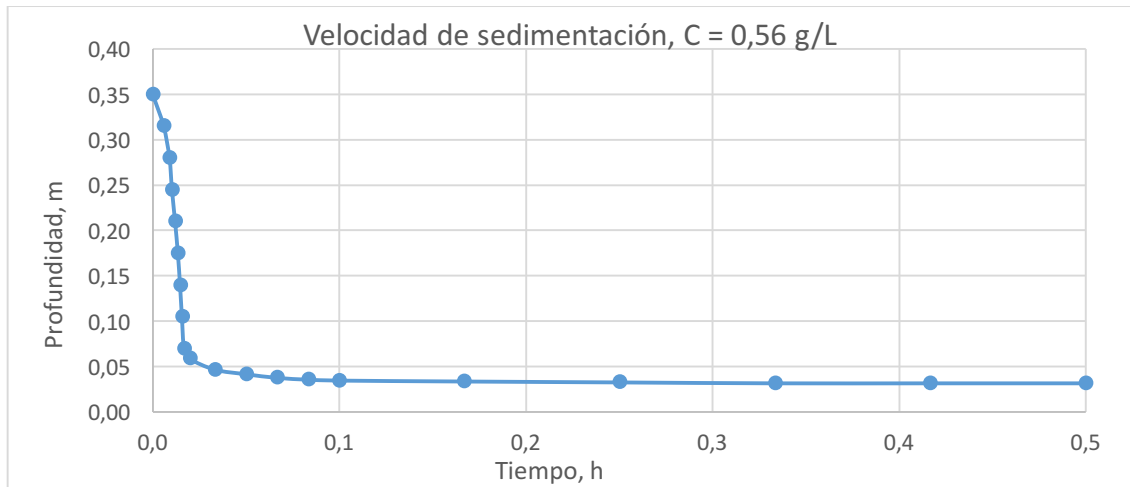


Gráfico 3: variación de la profundidad de la interfase con el tiempo para una concentración de sólidos de 0,56 g/L y una dosificación de coagulante de 9,5 mg/L.

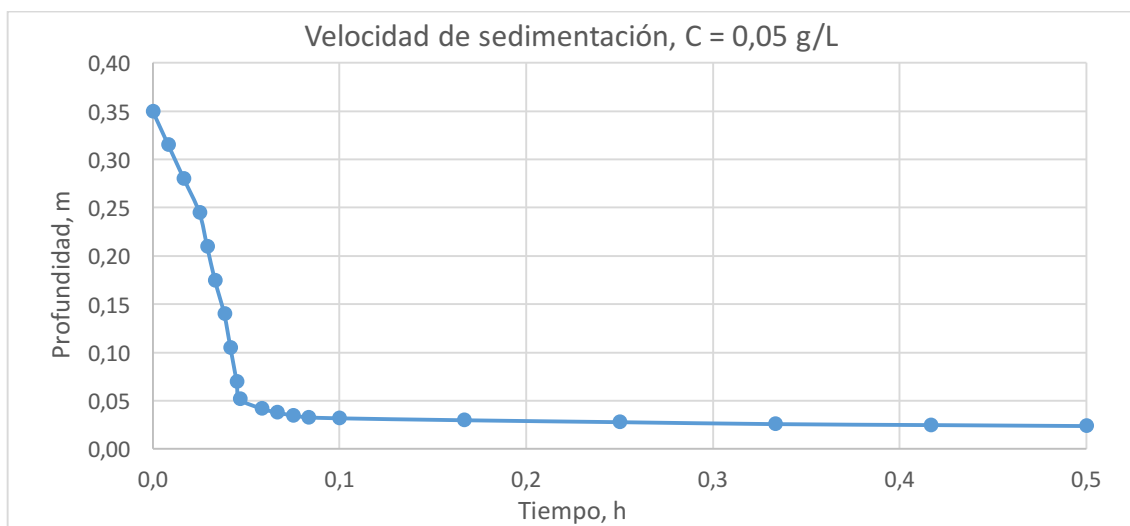


Gráfico 4: variación de la profundidad de la interfase con el tiempo para una concentración de sólidos de 0,05 g/L y una dosificación de coagulante de 12 mg/L.

6.3 Variación del pH.

El coagulante utilizado para la separación de la biomasa ha sido policloruro de aluminio PAX. La dosificación se ha realizado directamente al floculador con una bomba dosificadora por pulsos de 1 mL, que toma de una dilución de concentración variable dependiendo la demanda. El dosificador se regula modificando el tiempo entre cada pulso para obtener la dosis deseada sabiendo que el caudal de trabajo del decantador es de 400 L/h.

Para estudiar como el coagulante varía el pH del agua en su paso por el decantador, se ha tomado de forma sistemática el pH en la entrada, floculador y salida del decantador. Como la dosis se ha ido modificando en función de las demandas

calculadas en el jar-test, el decantador ha estado trabajando con diferentes dosis dependiendo del requerimiento de la entrada. En el Gráfico 5 se representan los valores de pH obtenidos en los tres puntos de muestreo: a la entrada, donde el flujo aún no ha entrado en contacto con el coagulante, y en la V₃₀ y a la salida del decantador, cuando ya se han mezclado con el coagulante. En el Gráfico 5 se observa una clara disminución del pH en el momento en el que entra en contacto con el coagulante.

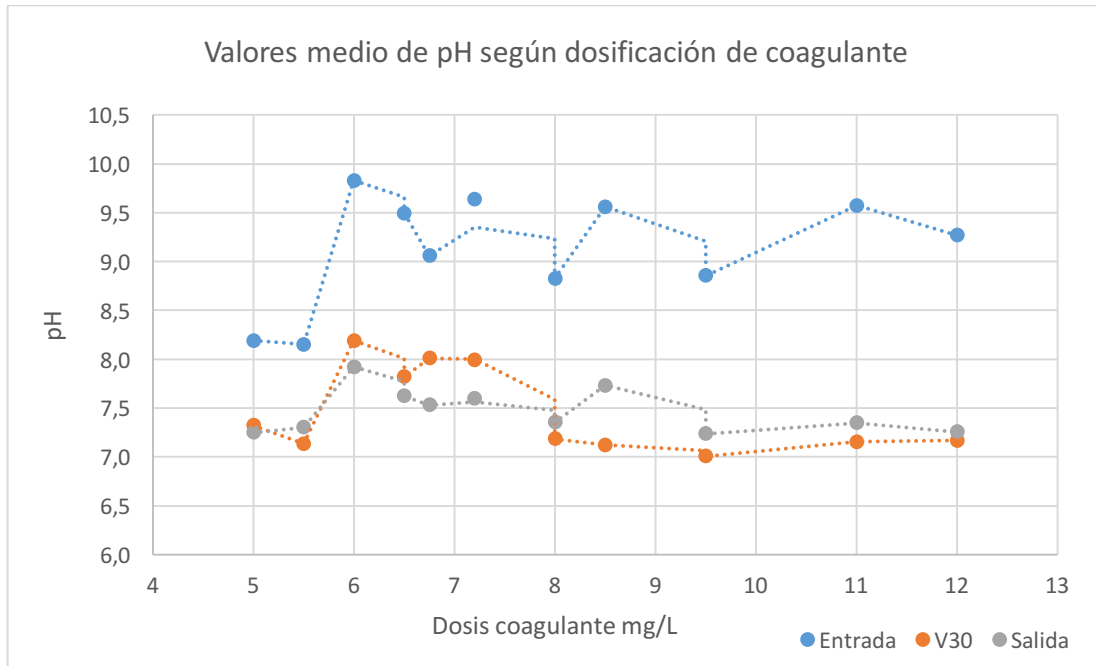


Gráfico 5: Valores de pH en función de la dosificación de coagulante requerida por el jar-test a la entrada del decantador.

Para el análisis los datos se han ordenado en función de la dosis de trabajo, que ha variado entre 5 y 12 mg/L y se ha tomado como referencia el pH a la entrada de decantador. Posteriormente se ha calculado la diferencia entre los valores de cada punto de muestreo y el pH de la entrada y se han agrupado en 11 grupos, uno para cada dosis de trabajo. Finalmente a cada grupo se le ha asignado el valor promedio de todos los valores que lo forman, obteniendo así un valor medio para cada dosificación. La desviación estándar para los valores medios en el floculador es de 0,53 y para los valores de salida un 0,44.

En el Gráfico 6 se representan los resultados obtenidos, que corresponden a las diferencias de pH entre la entrada del decantador y los dos puntos de muestreo, floculador y salida. De esta manera se ha obtenido una recta de regresión para cada punto y conocer su variabilidad.

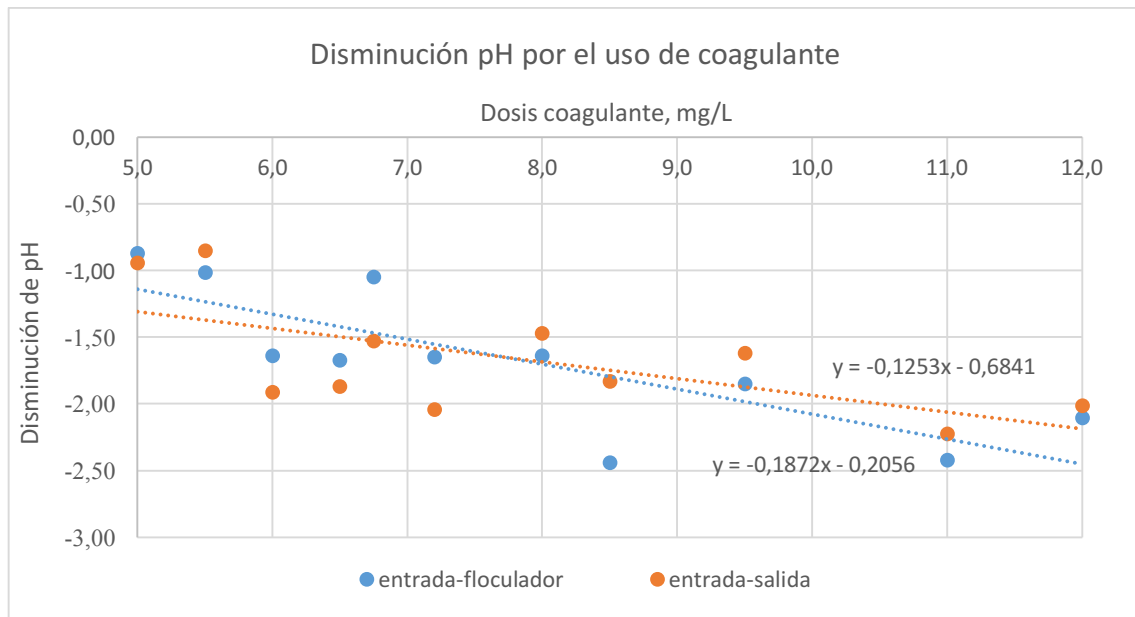


Gráfico 6: variación de pH en el floculador y la salida respecto a la entrada del decantador.

En primer lugar se observa que no existe una diferencia significativa entre floculador y salida. La variación media entre estos dos puntos es de 0,26, casi despreciable, y su desviación estándar de 0,17. Pero la variación entre la entrada y los dos puntos de muestreo se encuentra entre -1 -2,5 trabajando en un rango de dosificación de entre 5 y 12 mg/L. Hay una ligera diferencia en la tendencia de la disminución de pH para cada punto. Mientras en el floculador se observa que el pH disminuye -0,19 por cada mg/L aumentado de la dosis, en la salida la disminución es de -0,13 por cada mg/L que aumentamos la dosis. Esto quiere decir que el pH se recupera un 0,26 de media desde el floculado a la salida del decantador.

6.4 – Volumen, concentración y biomasa obtenida.

En esta parte del trabajo se pretende estudiar la relación que hay entre el proceso de sedimentación que se da en el floculador y el decantador. Para este estudio se han utilizado los datos de los ensayos del test de sedimentación V_{30} del apartado 5.2.5 y del test de purga del apartado 5.2.5.

En estos ensayos se han obtenido datos del volumen de sedimentación, las concentraciones de sólidos totales en dichos volúmenes y el peso total de biomasa, todos ellos para 2 horas de funcionamiento del decantador con caudal de 400 L/h.

En primer lugar se han calculado los volúmenes sedimentados en dos horas a partir de los ensayos V_{30} y purga. Éstos se han calculado tomando los volúmenes de los ensayos V_{30} de 1 litro y se han multiplicado por los litros que entran al decantador en las dos horas de trabajo.

En el Gráfico 7 se observa una diferencia entre ambos valores, obteniendo volúmenes menores para la purga que para los ensayos V_{30} del floculador. Esta diferencia esperada viene dada por el mayor rendimiento de sedimentación del decantador, al

tener mayor superficie de contacto para sedimentar gracias a la zona lamelar. Pero también es debido a que el tiempo de retención de la biomasa sedimentada en el decantador es 4 veces mayor que en el ensayo V30, ya que la sedimentación en la V30 dura 30 minutos y las purga se realiza a intervalos de dos horas. Esto da lugar, en cierto grado, al proceso de sedimentación por compresión, donde el peso del sedimento toma un papel importante al desplazar el agua hacia la parte superior, aumentando la concentración y reduciendo el volumen. Este proceso es mencionado en el apartado 3.1.3. pero no es objeto de estudio en este trabajo.

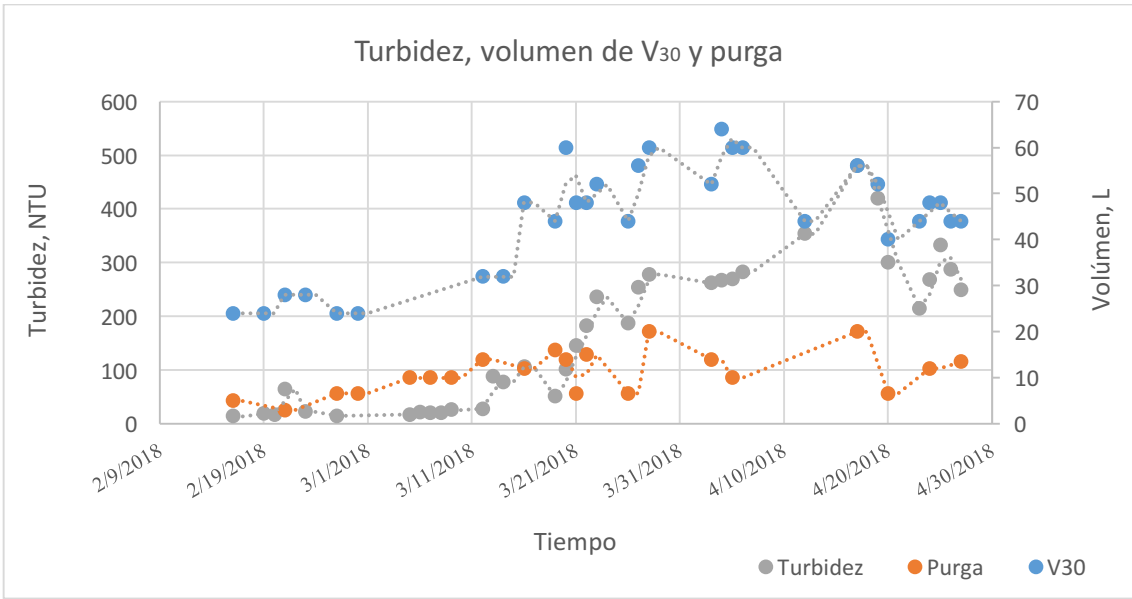


Gráfico 7: turbidez de entrada y volúmenes de sedimentado en 2 horas en floculador y en decantador.

También se observa que la diferencia entre los dos volúmenes es menor cuando hay menos biomasa sedimentada y aumenta cuando se tiene más biomasa.

Si se dividen ambos sectores y se calcula el promedio de los valores en estos dos intervalos de tiempo, del 16/02 al 15/03 y del 15/03 al 27/04, se puede obtener el incremento medio en la sedimentación de cada intervalo, así como el porcentaje que dicho incremento representa en cada intervalo.

Tabla 3: Medias y porcentajes en el incremento de sedimentación entre floculador y purgar.

	Medias	
	Del 16/02 al 15/03	Del 15/03 al 27/04
Purga, L	8,58	12,88
V ₃₀ , L	27,00	51,22
Incremento, L	18,42	38,32
Incremento %	68%	75%

Si se comparan estos resultados con la turbidez de entrada, se puede comprobar cómo este incremento en la sedimentación aparece a partir de valores superiores a 100 NTU.

Con los valores de la Tabla 5 y Gráfico 7 se puede establecer que, para turbideces inferiores a 100 NTU, se deberá tener en cuenta una disminución del volumen del 68% respecto al volumen obtenido a partir del ensayo V_{30} . Para turbideces superiores a 100 NTU se tomará una disminución de volumen del 75% respecto al volumen obtenido con el ensayo V_{30} . Con estas dos relaciones se puede aproximar el caudal de purga que necesita el decantador realizando dos ensayos sencillos, V_{30} y medición de turbidez. Sin embargo hay que tener en cuenta que los datos de purga tienen una desviación de 3,5 puntos en el tramo 1 y 4,53 en el tramo 2, lo que supone un 40% y 35% respectivamente. Esto indica una alta variabilidad en el volumen de las purgas respecto a los ensayos de V_{30} , donde las desviaciones son de 13% y 14% en los tramos 1 y 2 respectivamente.

Para comprobar si los valores obtenidos experimentalmente se corresponden a los cálculos teóricos desarrollados en el apartado 3.1.3, tomamos la ecuación 3-18 para calcular cual debería ser el caudal de purga, tomando los valores de la concentración de entrada (C_i), el caudal de entrada (Q_i), y la concentración obtenida en los ensayos de purga (C_u). Si para cada valor se aplica la formula 3-18

$$Q_u = \frac{Q_i C_i}{C_u}$$

se obtienen los valores de Q_u teóricos, que se puede comparar con los valores de purga obtenidos. Para la obtención de los caudales Q_u de las muestras tomadas, se han tomado los volúmenes de purga obtenidos en los ensayos y se han dividido por el tiempo entre purga, 2 horas.

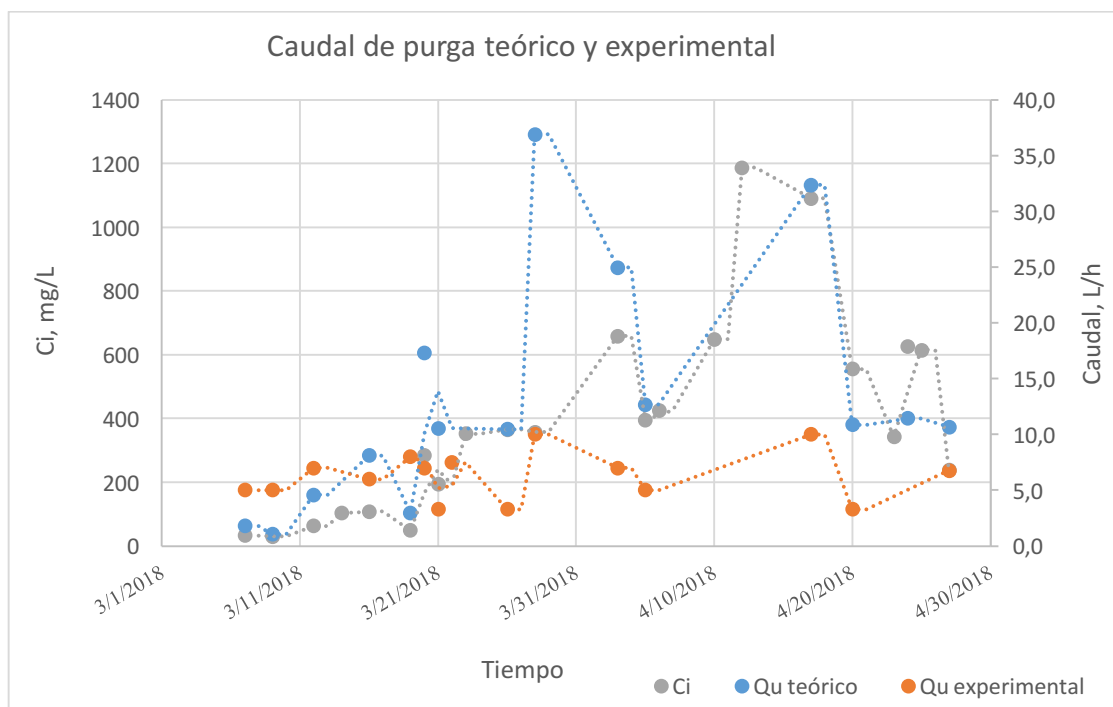


Gráfico 8: comparación del caudal teórico y experimental de purga.

En el Gráfico 8 se puede apreciar que no existe una correlación clara entre los cálculos teóricos y los datos obtenidos experimentalmente. Observamos que para las

concentraciones altas de entrada C_i , los valores teóricos indican que se debe realizar purgas mucho mayores a las que se han observado en los ensayos, mientras que para concentraciones bajas los valores obtenidos en de forma teórica, aunque no se correlacionan, están dentro del mismo rango de valores. Esto quiere decir que el flujo de purga ha estado por debajo del flujo límite, debiendo provocar el desbordamiento del decantador.

Efectivamente esto se ha podido comprobar durante las tareas de mantenimiento del decantador donde, a pesar de no llegar al desbordamiento, se ha observado acumulación de biomasa que ha sido purgada manualmente. Sin embargo esta biomasa no se encontraba en la parte inferior de la zona de purga, ya que en los test de purga se observó como a partir de los litros purgados de biomasa, si se continuaba purgando con el mismo caudal, solo se obtenía agua clarificada o con muy poca concentración.

Para representar estos hechos con los datos de los ensayos, se han comparado los valores de concentración de biomasa en los ensayos de V_{30} y test de purga y los gramos totales obtenidos en dos horas de funcionamiento del decantador.

El Gráfico 9 muestra como la concentración de la purga es mayor en la mayoría de casos. Aunque para las concentraciones en la V_{30} inferiores a 10 g/L no existe esta diferenciación, coincidiendo con turbideces de entrada inferiores a los 100 NTU.

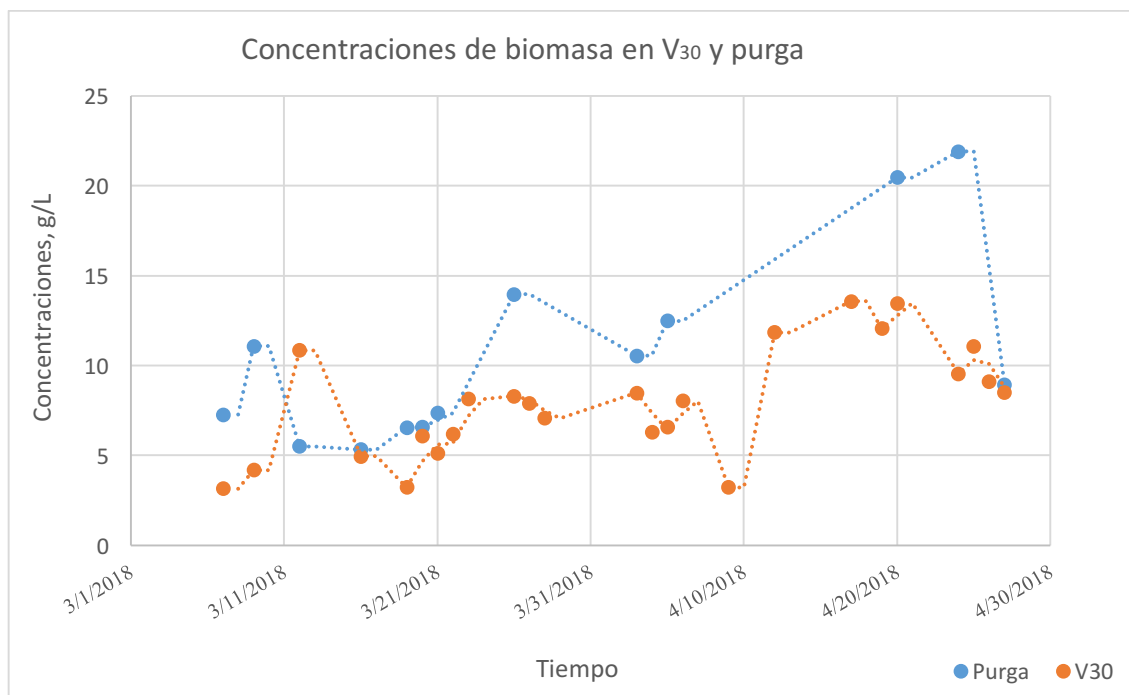


Gráfico 9: biomasa total obtenida en el test de purga y en el floculador en dos horas de funcionamiento del decantador.

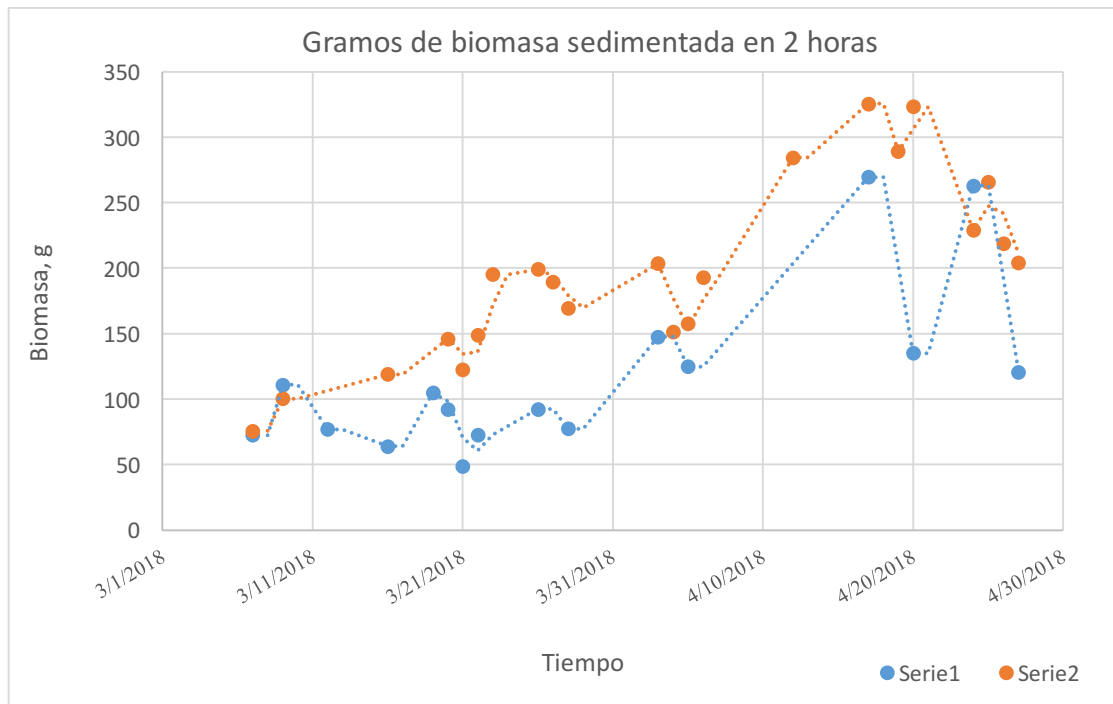


Gráfico 10: concentraciones de biomasa en V30 y test de purga en dos horas de funcionamiento del decantador.

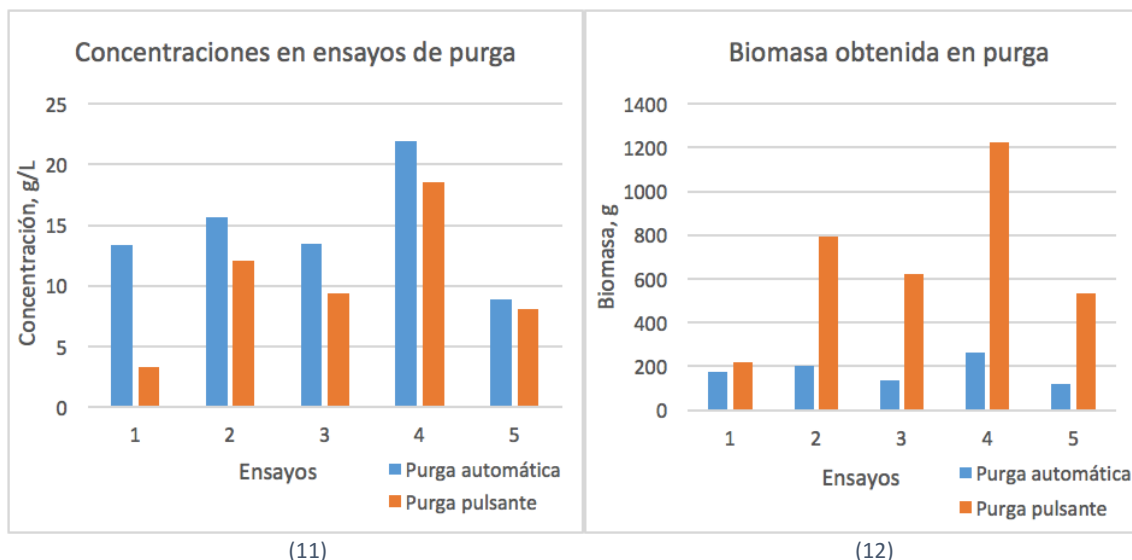
Para comparar los gramos totales de biomasa obtenidos en el ensayo V_{30} con la purga realizada cada dos horas, se han multiplicado los valores de sólidos totales de la V_{30} , ensayo realizado en columna de 1 litro, por el total de litros que entran al decantador durante las dos horas de trabajo. Estos dos valores se muestran en el Gráfico 10, donde se puede apreciar con claridad que hay un desfase entre las biomasa que entra al floculador y la que es purgada. Esto confirma numéricamente que hay una parte de la biomasa que queda retenida en el decantador.

6.5. Purga pulsante

Como se ha mencionado anteriormente, en la tareas de funcionamiento y mantenimiento de decantador, se ha extraído manualmente la biomasa acumulada fuera de la zona de purga. Al ver que este proceso requería realizarse de forma periódica, se han realizado una serie de pruebas con purga pulsante, con la intención de eliminar de forma automática la biomasa acumulada.

Siguiendo el procedimiento explicado en el apartado 5.2.6, se han realizado cinco ensayos con la intención de forzar a la biomasa acumulada a descender hasta la zona más baja del decantador y poder ser purgada. Para ello se ha forzado el caudal de purga abriendo el desagüe del decantador durante el proceso de purga, en diferente forma y tiempo para cada ensayo. Como resultado se han obtenido los datos mostrados en la Tabla 2.

Para el análisis de dichos datos, éstos se han representado en dos Gráficos de columna doble, 11 y 112, donde se realiza una comparación entre las concentraciones y la biomasa total obtenida respectivamente.



Gráficos 11 y 12: ensayos de purga y purga pulsante para forzar la evacuación de la biomasa acumulada en el decantador.

En cuanto a la concentración se observa que en todos los ensayos, la concentración en la purga con pulsos es ligeramente menor. Esto puede explicarse con el hecho que la purga pulsante sea mucho más larga que la automática, lo que conlleva a asumir tramos de purga con menos concentración hasta llegar al agua clarificada, como por ejemplo la capa de agua entre la zona de purga y la biomasa que se acumula por encima a la que se desea llegar.

Sin embargo en el ensayo 1 se observa una diferencia importante entre las dos concentraciones. En dicho ensayo se alarga la purga sin la realización de pulsos de caudal a través del desagüe. El resultado ha sido que en la extensión de la purga, desde el final de la purga automática de 20 litros hasta los 66 litros sin pulsos de caudal, se ha obtenido agua clarificada. Por tanto, al realizar la mezcla de todo el muestreo, se ha mezclado las primeras muestras con concentraciones, alrededor de los 10 g/l y el resto de muestras que solo contenían agua clarificada o muy poca concentración de sólidos. De esta manera se ha disminuido drásticamente la concentración global de la muestra tomada para el ensayo de sólidos totales. Esta información es excepcionalmente relevante para conocer el comportamiento del decantador, ya que indica que si se continua purgando con el mismo caudal de 400 L/h, no se logrará hacer descender la biomasa acumulada por encima de la zona de purga. No se puede acceder visualmente al interior del decantador, pero sí se ha podido comprobar en depósitos mas pequeños, como el espesador, que cuando la viscosidad de la biomasa sedimentada es elevada y el caudal de purga pequeño, el agua clarificada del sobrenadante circula por canales preferentes hasta la salida inferior de purga sin que la biomasa apenas descienda.

Si se comprueba como varía la biomasa total obtenida en cada ensayo, se observa que en todos los casos, excepto para el ensayo 1, aumenta significativamente cuando se realizan pulsos de aumento de caudal repentino periódicamente a lo largo de la purga. Mientras que el caudal de la purga lo es mantenido a 400 L/h, se realizan aberturas en el desagüe para provocar el aumento brusco de caudal, lo que hace descender el nivel

repentinamente, logrando así que la biomasa acumulada por encima de la zona de purga descienda y alcance la salida.

En el ensayo 1 no se obtiene un aumento significativo de la biomasa, ya que como se ha mencionado anteriormente a lo largo de la purga sin pulsos solo se obtuvo agua clarificada.

En el ensayo 4 es donde se observa el aumento más significativo, aumentando cuatro veces la biomasa obtenida. A pesar de estos resultados, sería erróneo pensar que el decantador acumula constantemente 4 veces más biomasa de la que se purga, ya que parte de la biomasa obtenida en los ensayos con pulsos puede haber sido retenida con anterioridad. Pero se puede concluir que es necesario el aumento del caudal de purga para lograr evacuar toda la biomasa sedimentada.

En el ensayo 4 en particular, es donde se han realizado pulsos de caudal más repetidamente, realizando pulsos de 3 segundos cada 15 segundos. Los demás ensayos, que realizan los pulsos cada 30 segundos y cada minuto, no resultan ser tan efectivos, por lo que se deduce que el procedimiento óptimo de la purga sería el de realizarla toda a un caudal de 2L/s, el que ofrece el desagüe de 1 ½ pulgada en abertura libre.

Desde el punto de vista de la clarificación del agua, este comportamiento de la biomasa es favorable, ya que, al crear una capa en la parte inferior de la zona lamelar, actúa de filtro donde las partículas más finas son atrapadas. Este comportamiento es similar al de la fase de sedimentación zonal, pero en lugar de ser la capa de biomasa la que desciende y arrastra el resto de partículas, aquí el manto se encuentra estático y es el agua la que lo atraviesa, depositando en él las partículas que contiene.

Para comprobar este fenómeno numéricamente se han representado los datos de la turbidez de entrada, del sobrenadante de la V_{30} y a la salida del decantador en el Gráfico 13. Se debe tener en cuenta que los valores de entrada están representados a una escala de 0-600 NTU y los valores de V_{30} y salida en una escala de 0-25 por lo que los valores de entrada siempre son superiores al de los otros dos ensayos. En dicho gráfico se aprecia como la turbidez en el sobrenadante del ensayo de la V_{30} tomada del floculador se ve influido por la turbidez de entrada, siguiendo su misma tendencia, tanto en valores bajos como altos. Estos valores se asemejan mucho a la realidad, ya que la turbidez en la V_{30} es tomada en un ensayo de columna que permanece en reposo 30 minutos y el tiempo de retención en el tranquilizador es de 27.

Sin embargo la turbidez a la salida del decantador a penas se ve alterada por las variaciones a la entrada, sobretodo cuando los valores aumentan por encima de 100 NTU. En estos valores altos, mientras que la V_{30} sigue su tendencia, a la salida del decantador se mantienen los valores dentro del mismo rango que para valores inferiores. Esto muestra como la función de cada compartimento del decantador, es capaz de amortiguar de forma eficiente los aumentos drásticos de biomasa, siempre y cuando se opere en correctas condiciones de caudal y dosificación de coagulante.

Cierto es que el decantador trabaja muy por debajo de su carga hidráulica, lo que también explica este comportamiento.

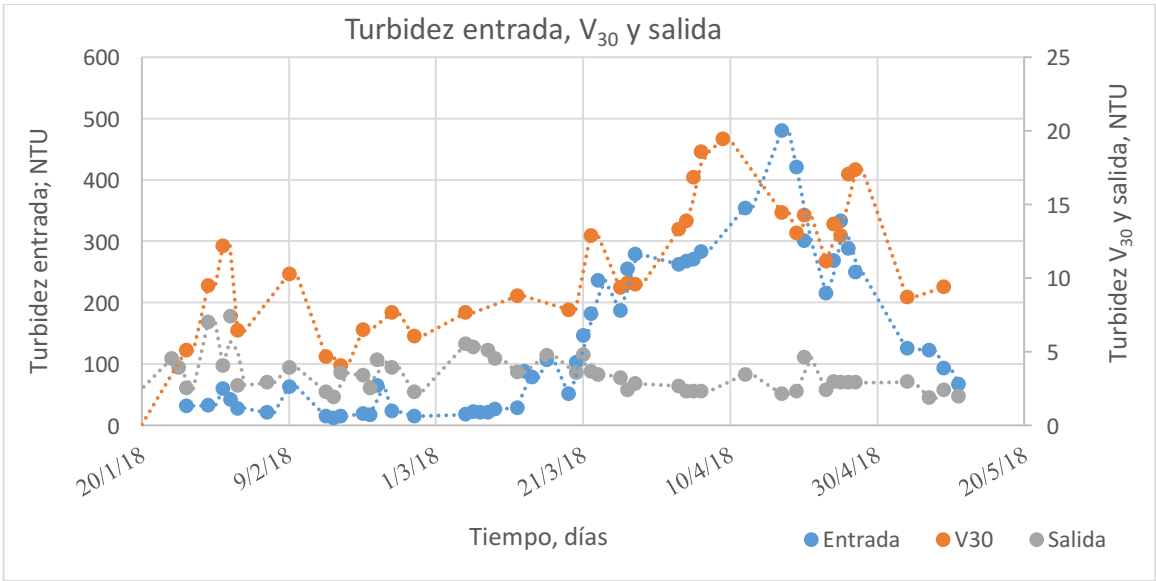


Gráfico 13: valores de turbidez para la entrada, sobrenadante de V_{30} y salida del decantador.

7. Trabajo futuro

Como se ha visto en los resultados de los apartados 6.1 y 6.4, los dos aspectos con prioridad de mejora son el bajo tiempo de retención del floculador y el insuficiente caudal de purga respectivamente. Para abordar estos dos temas se ha elaborado una propuesta de mejora para cada uno de ellos.

7.1. Ampliación floculador

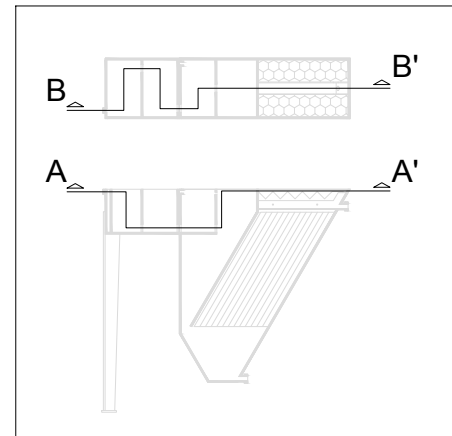
Para el aumento del tiempo de retención en el proceso de floculación se ha propuesto una ampliación del volumen añadiendo dos compartimentos iguales al existente, conectados entre si, de manera que su funcionamiento se produzca en serie. La intención es, además del aumento de volumen y por tanto del tiempo de retención, la posibilidad de disminuir gradualmente la intensidad de la agitación en cada uno de los compartimentos, de forma descendiente en el sentido de circulación. De esta manera se pretende obtener un engordamiento de los flóculos a la llegada del tranquilizador.

En la Figura 15 se muestra el plano detallado para la elaboración e instalación de la ampliación del floculador. Ha sido diseñado para ser fabricado ex situ y con las conexiones mecánicas necesarias para su posterior conexión al decantador existente en planta. El en plano se ha diferenciado entre la parte existente (10), graficada en línea gris, y la parte a construir, graficada en línea negra.

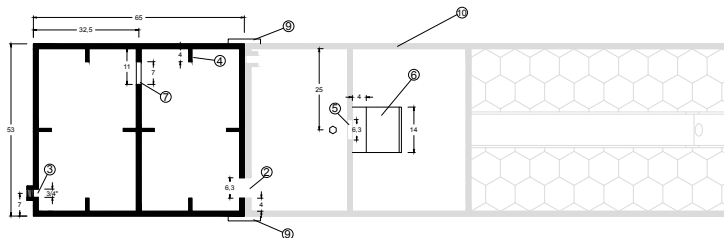
Se han previsto costillas (4) dispuestas en los laterales para generar mayor turbulencia y favorecer la agitación y mezcla del coagulante en los dos primeros compartimentos. El paso entre compartimentos se ha situado en la parte inferior para evitar la caída, a cierta altura, de los flóculos y evitar una posible disgregación de los mismos. Además, estos pasos (2, 3 y 7), están dispuestos en zig-zag para evitar la aparición de flujos preferentes de un compartimento a otro. La salida al tranquilizador se ha modificado, situándola también en la parte inferior y con un deflector inclinado para la correcta dispersión de los flóculos

- ① Soporte del motor.
- ② Conexión entre ampliación y decantador.
- ③ Entrada.
- ④ Costillas
- ⑤ Nueva salida al tranquilizador en la zona inferior.
- ⑥ Deflector a la salida al tranquilizador
- ⑦ Paso entre compartimentos.
- ⑧ Tapa para zona de motores.
- ⑨ Plancha de unión soldada.
- ⑩ Decantador existente.

Secciones



Sección A-A'



Sección B-B'

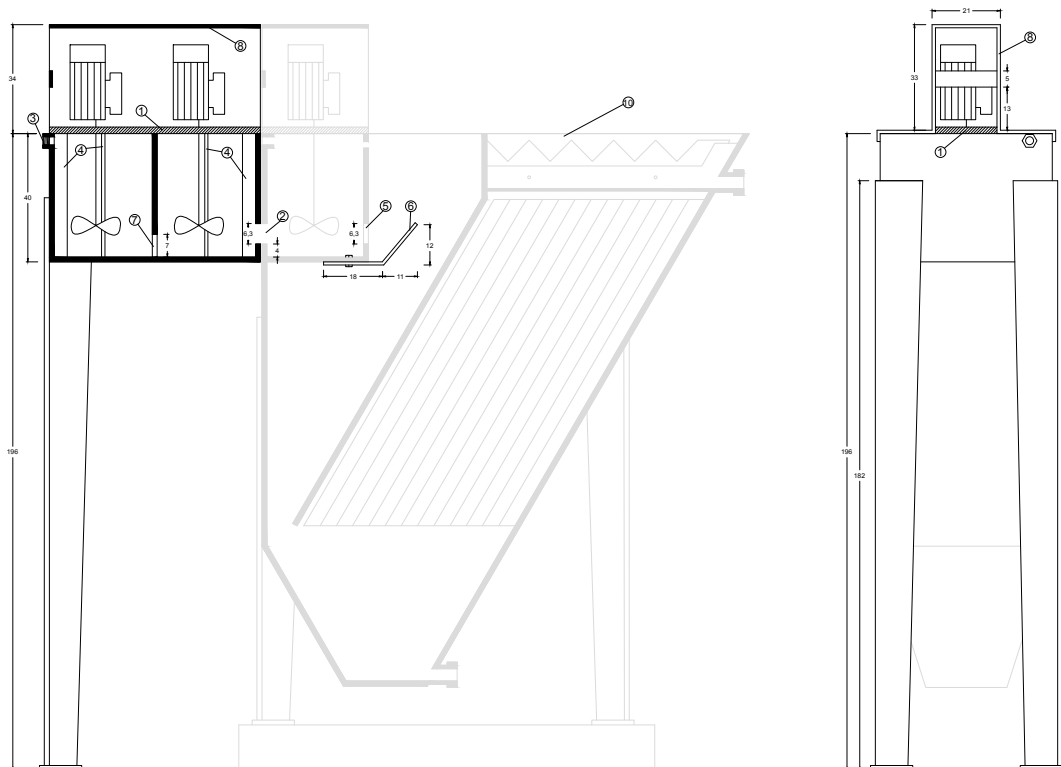


Figura 15: Plano detallado para la ampliación del floculador.

7.2. Purga pulsante.

Para la mejora de la purga y poder realizarla de manera que se logre eliminar la biomasa acumulada por encima de la zona de purga, se ha planteado una modificación de la instalación de purga.

Para esta modificación será necesario un aumento de la sección del conducto de purga, pasando de $\frac{3}{4}$ de pulgada a $1\frac{1}{2}$ pulgadas, una electroválvula (Ilustración 6) de $1\frac{1}{2}$ pulgadas para el control de las purgas y un relé programable para programar los tiempos de abertura y cierre.

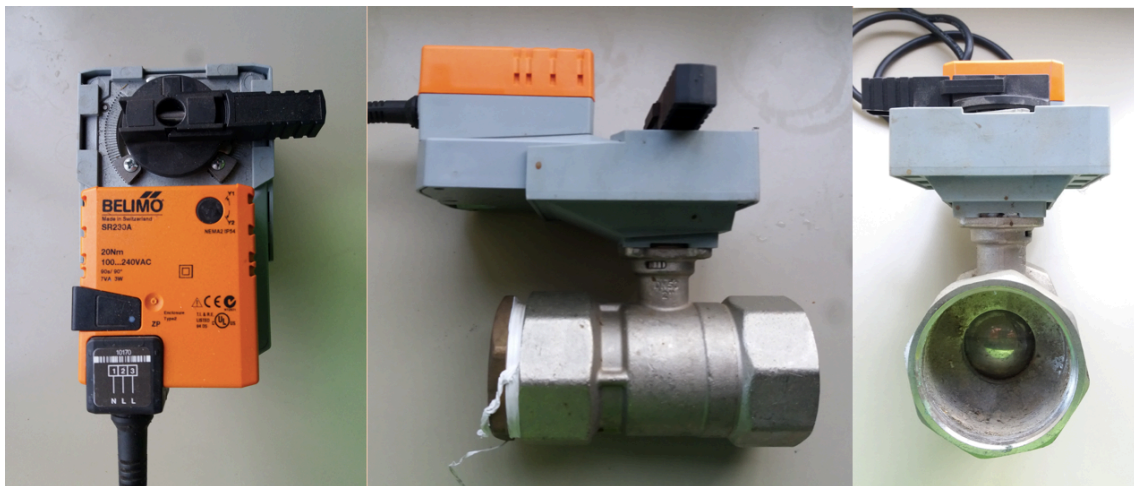


Ilustración 6: electroválvula de 1,5 pulgadas para control de purgas.

El modo de operación se realizará en base a los datos de caudal en abertura libre, obtenidos con el medidor por ultrasonidos FLEXIM UMFLUXUS_F6V4-0EN descrito en el apartado 6.5, que al obtener un caudal de 2 L/s, provoca el descenso de la biomasa acumulada por encima de la zona de purga. Este caudal se midió para una salida en la parte inferior del decantador, tal y como se realizaron los ensayos de purga pulsante. Sin embargo la biomasa se debe hacer llegar a un espesador, cuya entrada está aproximadamente a la mitad de la altura del decantador, por ello se ha realizado otra medición de caudal colocando la salida a dicha altura y el caudal es de 1 L/s.

Como se muestra en el apartado 6.5 las purgas de 10 minutos con pulsos han resultado ser eficaces a la hora de hacer descender la biomasa del decantador y concretamente el ensayo 4 es con el que se ha obtenido mejor resultado. Tomando los valores de los dos caudales en dicho ensayo, la purga con bomba peristáltica y los pulsos de aumento de caudal con el desagüe, se obtiene el volumen total de purga.

En primer lugar el volumen extraído con la bomba peristáltica, a un caudal de 400 L/h durante 10 minutos, es de 66,7 litros. En segundo lugar el volumen extraído con la abertura libre del desagüe, con un caudal de 2 L/s, durante 3 segundos y cada 15 segundos desde la finalización de la purga automática, minuto 3 hasta el minuto 10, es de 168 litros. Por tanto el volumen total purgado durante este ensayo ha sido 234,7 litros. Sin embargo, durante la realización del mismo se ha observado de forma visual que, entre pulso y pulso de caudal, la concentración de la purga variaba. Aumentando justo después de la abertura del desagüe y disminuyendo hasta realizar el nuevo pulso.

Esto indica que la biomasa solo descendía cuando el caudal era mayor al de la purga automática, y que por tanto, si se hubiera realizado toda la purga con caudal elevado la biomasa se hubiera extraído en menos tiempo y volumen de purga.

Para la realización de un ensayo futuro se propone la conexión decantador - espesador a través de la electroválvula y a la altura correspondiente a la entrada al espesador, de modo que el caudal en abertura libre sea 1 L/s. Los ensayos a realizar serán el control del tiempo de abertura de la válvula para la extracción de la biomasa en función de la turbidez de entrada y el volumen sedimentado en la V_{30} , de manera que se obtenga una base de datos similar a la del Gráfico 7 del apartado 6.4.

8. Conclusiones

El estudio de las características técnicas del decantador ha indicado que trabaja por debajo de su capacidad. El valor teórico obtenido para la carga hidráulica ha resultado ser 0,135 m/h, mientras que los ensayos de columna han mostrado una velocidad de sedimentación de 6 m/h en las condiciones más desfavorables. Sin embargo, el floculador ha resultado ser el factor limitante, ya que su volumen conlleva un bajo tiempo de retención hidráulica, limitando el caudal de trabajo a 400 L/h.

Los ensayos de Jar-test, junto con los muestreos de turbidez a la salida del decantador, han demostrado que existe una relación entre la turbidez de entrada y el requerimiento de coagulante para una clarificación a la salida del decantador por debajo de los 5 NTU. Los resultados de los ensayos indican que, para turbideces de entre 20 y 500 NTU a la entrada del decantador, se puede establecer la siguiente relación $y = 0,0114x + 6,8204$ con un $R^2 = 0,8209$, donde y es la dosificación de coagulante en mg/L y la x es la turbidez en NTU a la entrada del decantador.

La comparación de los muestreos de pH, tomados en la entrada, el floculador y la salida de decantador y la dosis de coagulante en cada muestreo, ha permitido determinar que el uso del policloruro de aluminio provoca un descenso del pH de 0,19 por cada mg/L de coagulante aumentado en la dosificación en el floculador y de 0,13 a la salida del decantador, observando una pequeña recuperación en el transcurso por el decantador.

Los ensayos de sedimentación V_{30} y purga del decantador han determinado que es posible establecer una relación entre ambos teniendo en cuenta dos rangos de trabajo en cuanto a turbidez de entrada al decantador. Para valores inferiores a 100 NTU el volumen de purga requerido en el decantador ha resultado ser un 68% menor al obtenido en el ensayo v_{30} y para valores de entre 100 – 500 NTU el volumen de purga requerido ha sido de un 75% menor al obtenido en mismo ensayo V_{30} .

Sin embargo, el análisis de balance de masas ha mostrado que parte de la biomasa queda retenida en el decantador por encima de la zona de purga y que, para poder eliminarla, es necesario aumentar el caudal de purga a valores de entre 1 y 2 L/s, consiguiendo así hacerla descender hasta la salida.

Finalmente se puede concluir que el decantador es capaz de soportar correctamente las subidas de concentración a la entrada, obteniendo agua clarificada a la salida por debajo de los 5 NTU, pero es muy sensible a condiciones de operación incorrectas en cuanto a dosificación y caudales.

9 – Referencias

John C. Crittenden, R. Rhodes Trussell, David W. Hand, Kerry J. Howe, George Tchobanoglous. *MWH's Water Treatment: Principles and Design*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012

Raí H. R. Hanashiro, Caroline B. Stoco, Thamayne Valadares de Oliveira, Marcelo K. Lenzi, André . 10 Mariano, Rafael . Vieira. *Experimental validation of hindered settling models and flux theory applied in continuous flow process for harvesting *Acutodesmus obliquus**. Curitiba: The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2018.

Raquel Gutiérrez, Fabiana Passos, Ivet Ferrer, Enrica Uggetti, Joan García. *Harvesting microalgae from wastewater treatment systems with natural flocculants: Effect on biomass settling and biogas production*. Barcelona: Elsevier, 2015.

Raquel Gutiérrez, Ivet Ferrer, Enrica Uggetti, Carme Arnabat, Humbert Salvadó, Joan García. *Settling velocity distribution of microalgal biomass from urban wastewater treatment high rate algal ponds*. Barcelona: Elsevier, 2016.

Saady, Noori M. Cata. *experimental verification of inclined plate settling models*. Windsor: International peer-reviewed journal, 2011.

Vargas, Lidia de. *Tratamiento de agua para consumo humano*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2004

10. Agradecimientos

En primer lugar, a Joan García por una inmejorable tutela a la hora de abordar el planteamiento y los retos de este estudio. Su guía e implicación han sido imprescindibles para la elaboración de este trabajo.

En segundo lugar a Eduardo Álvarez, por el incansable soporte técnico en todos los procesos de funcionamiento del sistema de decantación. Sus conocimientos en electromecánica han hecho posible el correcto funcionamiento del sistema.

A Enrica Uggetti por la guía en los recursos docentes y organización de datos.

A Anna Rinaldi por la ayuda prestada en los trabajos de muestreo, convirtiéndose en una compañera de estudio excelente.

A Vojtech Belohlav y Rubén Díez por el apoyo en trabajos de mantenimiento y funcionamiento de la planta piloto.

A David Marin de Jesus por la ayuda en la edición del trabajo.

A Miguel Masip por el control diario del funcionamiento de la planta y el soporte en la resolución de cuestiones técnicas.